

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

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE
ELEVADA DEFORMAÇÃO COMO PAVIMENTO DE TABULEIROS METÁLICOS**

Carine Molz

Porto Alegre

2021

CARINE MOLZ

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE
ELEVADA DEFORMAÇÃO COMO PAVIMENTO DE TABULEIROS METÁLICOS**

Dissertação de mestrado apresentado 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. Washington Peres Núñez

Coorientadora: Prof. Dra. Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre

2021

Molz, Carine
AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS DE ELEVADA DEFORMAÇÃO COMO PAVIMENTO DE
TABULEIROS METÁLICOS / Carine Molz. -- 2021.
139 f.
Orientadora: Ângela Gaio Graeff.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. ECC. 2. Tabuleiro metálico. 3. Pavimentação. 4.
Retração. 5. Aderência. I. Gaio Graeff, Ângela,
orient. II. Título.

CARINE MOLZ

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE
ELEVADA DEFORMAÇÃO COMO PAVIMENTO DE TABULEIROS METÁLICOS**

Porto Alegre, 20 de dezembro de 2021

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, BR
Orientador

Prof.^a Ângela Gaio Graeff
PhD. pela University of Sheffield, UK
Orientadora

Prof.^a Angela de Moura Ferreira Danilevz
Coordenadora do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Mônica Regina Garcez (UFRGS)
Dra. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Ph. D. University of Leeds, UK

Prof. Romildo Dias Toledo Filho (UFRJ)
Dr. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, BR

Prof. Fernando Silva Albuquerque (UFS)
Dr. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, aos meus pais, Solange e Marcio, a minha irmã Kelli e ao meu namorado Gabriel por todo incentivo, paciência, compreensão e apoio em todas as etapas da minha vida. Vocês são o meu alicerce.

Aos meus orientadores Washington e Ângela pela oportunidade de trabalharmos em conjunto, por todos os ensinamentos, paciência, pela motivação, disponibilidade e pela amizade que construímos. Fico extremamente grata por ter sido orientada por professores que compartilham o mesmo amor que eu possuo pela ciência. Estendo os agradecimentos a todos os demais professores do PPGCI que participaram da minha formação como mestre e que me auxiliaram para que hoje eu tenha chegado até aqui.

Aos meus amigos e companheiros do LEME pela convivência, acolhimento, ajuda, apoio e momentos de descontração: Danielle, Adriano, Débora R., Tobias, Helena, Débora B., Luiz, Eduardo e Lucas. Aos bolsistas e voluntários Melissa e Felipe por toda ajuda sempre que solicitado. Também aos funcionários do LEME que sempre me auxiliaram e me deram todo o suporte Edna, Edgar, Seu José e Jaciara. Vocês fizeram das minhas manhãs de laboratório mais leves e alegres.

Aos meus amigos e companheiros do LAPAV: Anna, Larissa, Natália, Matheus, Vitor, Lívia, Gracielli, Heller. Obrigada pela convivência, carinho e auxílio. Ao Camilo, amigo que compartilhou comigo toda a sua experiência e conhecimento em ECC desenvolvido durante sua tese de doutorado. Aos meus queridos colegas de mestrado: Diones, Henrique, Bruna, Matheus, Mariana, Daniel e Celso, obrigada pelo carinho, por toda ajuda, palavras de estímulo e pelas noites nos barzinhos de Porto Alegre.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, a qual me proporcionou a oportunidade de trabalhar integralmente no mestrado durante 27 meses.

À todas as empresas que acreditaram nesta pesquisa fornecendo informações e realizando doação de materiais para que ela pudesse ser concluída. Pela doação de aditivos: GCP Applied Technologies, Rodoquímica e Tecnomor. Pela doação de fibras de polipropileno Saint-Gobain Brasil. Pela doação de resina epóxi Sika Brasil. Pela doação de cinza de casca de arroz Silcca Nobre. Pelo suporte técnico da HBM – HBK Brasil com os problemas iniciais que ocorreram

durante captação de dados dos *strain gages* pelo Spider e software Catman Easy. Pelas informações sobre a ponte com vão móvel de Porto Alegre fornecidas pela CCR.

Aos meus amigos de longa data, Camila, Carolina, Diego, Charlote, Tairon, Paola, Ane, Henrique, Leonardo, Ticiane, Larissa, Thiago e Paola por todos os momentos de alegria compartilhados. Também aos amigos que o intercâmbio me trouxe e que sempre estão presentes, mesmo a distância: Ana, Letícia, Ygor e Jéssica.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que de alguma forma participaram da conclusão de mais essa etapa da minha formação acadêmica e que não foram nomeados nestes agradecimentos.

Wichtig ist, dass man nicht aufhört zu
fragen. Neugier hat ihren eigenen
Seinsgrund.

O importante é não parar de questionar. A
curiosidade tem sua própria razão de existir.

Albert Einstein

RESUMO

MOLZ, C. Avaliação da aplicabilidade de compósitos cimentícios de elevada deformação como pavimento de tabuleiros metálicos. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

O Engineered Cementitious Composite (ECC) é um compósito cimentício de alto desempenho e elevada ductilidade reforçado com fibras, caracterizado por uma grande capacidade de deformação quando submetido a esforços tração, formando múltiplas microfissuras. Esta pesquisa avaliou a aplicação do ECC como pavimento em tabuleiros metálicos, verificando o comportamento da estrutura em termos de cura, aderência e retração. A metodologia foi dividida em quatro etapas principais e duas etapas exploratórias. Inicialmente, realizou-se a experimentação de um traço referência (ECC_{LEME}), baseado em pesquisas anteriores desenvolvidas no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturas (LEME) da UFRGS, o qual considerou a inclusão de aditivo acelerador de cura. Também se avaliou uma dosagem alternativa com um estudo simplificado do percentual de substituição parcial do cimento por cinza de casca de arroz, adotando-se um teor de incorporação de 20% (ECC_{CCA}). Na primeira etapa foram testadas a retração por secagem, a trabalhabilidade e a resistência à compressão simples de oito combinações de aditivos superplastificante e acelerador de pega, considerando o traço referência. Com base no melhor arranjo de aditivos, na segunda etapa avaliaram-se as respostas mecânicas do traço referência (ECC_{REF}) e da dosagem alternativa (ECC_{CCA}) através dos ensaios de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, retração livre e por secagem. Para avaliar a aderência entre ECC e o tabuleiro metálico, na terceira etapa foram verificadas duas estratégias diferentes para promover a adesão entre esses materiais através do ensaio de cisalhamento oblíquo. Ainda, na quarta etapa foram construídos três modelos de pequena escala instrumentados para mensuração da retração restringida na base, avaliação visual da cura e da aderência. Como resultados, o ECC_{CCA} apresentou uma menor trabalhabilidade que o ECC_{REF} , porém exibiu maior resistência mecânica tanto à compressão quanto à flexão. Em relação aos ensaios de retração em ambiente controlado, não foram verificadas diferenças significativas entre os traços. Embora os compostos analisados não tenham apresentado o comportamento mecânico esperado para serem definidos como ECC's, como conclusão geral se verificou a aplicabilidade do ECC_{REF} e do ECC_{CCA} como pavimento em tabuleiros metálicos ao se utilizar resina epóxi para promover adesão entre os materiais.

Palavras-Chave: ECC. Tabuleiro metálico. Pavimento. Retração. Aderência. Cura.

ABSTRACT

MOLZ, C. Feasibility of the use of High Performance Reinforced Cement Composites as steel decks pavement. 2021. Dissertation (Masters in Civil Engineering) – Civil Engineering Graduate Program: Construction and Infrastructure, UFRGS, Porto Alegre.

Engineered Cementitious Composite (ECC) is a high performance and high ductility cementitious composite reinforced with fibers, characterized by a great deformation capacity when subjected to tensile stresses, developing multiple micro-cracks. This research evaluated of the application of ECC as steel deck pavement, verifying the behavior of the structure in terms of cure, adhesion, and shrinkage. The methodology was divided into four main steps and two exploratory steps. Initially, it was carried out the experimentation of a reference mix proportion (ECC_{LEME}), based on previous researches developed in the Laboratory of Structural Tests and Models (LEME) at UFRGS, which considered the inclusion of a cure accelerating additive. Additionally, an alternative mix proportion was also evaluated with a simplified study of the percentage of partial replacement of cement by rice-husk ash, adopting an incorporation content of 20% (ECC_{CCA}). In the first step, drying shrinkage, workability and resistance to simple compression of eight combinations of superplasticizer and cure accelerating additives were tested, considering the reference mix proportion. Considering the best additives combination, in the second step, the reference mix proportion (ECC_{REF}) and the alternative mix proportion (ECC_{CCA}) mechanical responses were evaluated through simple compressive strength, flexural tensile strength, free shrinkage and drying tests. To evaluate the adhesion between ECC and the steel deck, in the third step, two different strategies were verified to promote the adhesion between these materials through the oblique shear test. Still, in the fourth step, three instrumented reduced models were built to measure restricted retraction on the base, visual assessment of the cure and adherence. As results, ECC_{CCA} presented a lower workability than ECC_{REF}, but exhibited greater mechanical resistance to both compression and flexion. Regarding the shrinkage tests in a controlled environment, no significant differences were found between the traits. Although the analyzed materials did not present the expected mechanical behavior to be ECC's, as a general conclusion it was verified the applicability of ECC_{REF} and ECC_{CCA} as steel decks pavement when using epoxy resin to promote adhesion between the materials.

Keywords: ECC. Steel deck. Pavement. Shrinkage. Adhesion. Cure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Objetivos principais do programa experimental	22
Figura 2 – Classificação das fibras reforçadas com cimento.....	25
Figura 3 – Comportamento observado em compostos cimentícios.....	26
Figura 4 – Comportamento Strain hardening x Deflection hardening	27
Figura 5 – Múltipla fissuração de viga composta por ECC.....	28
Figura 6 – Curva de Tensão- Deformação	29
Figura 7 – Curva de tensão x deformação do ECC	29
Figura 8 – Materiais suplementares cimentícios com propriedades pozolânicas.....	32
Figura 9 – Melhoria da consistência do ECC com a adição de superplastificante.....	33
Figura 10 – Recapeamentos executados por Rodriguez (2018)	37
Figura 11 – Fissuras por retração plástica em pavimento de concreto.....	40
Figura 12 – Aplicação de métodos de cura úmida (à esquerda) e cura química (à direita) em rodovias diferentes	45
Figura 13 – Comportamento à flexão do ECC ensaiado em relação à simulação numérica.....	47
Figura 14 – Ponte Mihara (Hokkaido, Japão).	50
Figura 15 – Execução do ECC na Ponte Mihara.....	51
Figura 16 – Tabuleiro metálico da ponte Mihara.	51
Figura 17 – Planejamento experimental.....	52
Figura 18 – Cimento CPV-ARI RS.....	53
Figura 19 – Distribuição granulométrica do cimento.....	53
Figura 20 – Ensaio de determinação da massa específica do cimento:.....	54
Figura 21 – Cinza de Casca de Arroz.....	55
Figura 22 – Distribuição granulométrica da CCA.....	55
Figura 23 – Areia Fina.....	56
Figura 24 – Granulometria da areia.....	56
Figura 25 – Ensaio para determinação da massa específica da areia	57
Figura 26 – Fibra de Polipropileno (PP).....	58
Figura 27 – Sikadur Epóxi.....	59
Figura 28 – Trabalhabilidade do ECC _{LEME} : etapa exploratória.....	61
Figura 29 – Execução da moldagem de um dos traços avaliados na Etapa 1.....	62
Figura 30 – Moldagem da Etapa 2	65
Figura 31 – Corpo de prova composto para o ensaio de cisalhamento oblíquo	66
Figura 32 – Metodologias de aderência avaliadas.....	67

Figura 33 – Processo de abertura de ranhuras, à esquerda, e placa com ranhuras, à direita.....	68
Figura 34 – Processo de mistura do ECC.....	69
Figura 35 – Mesa de consistência e execução do ensaio de índice de consistência.....	70
Figura 36 – Ensaio de retração em CP 7,5 x 7,5 x 28,5 cm: (a) CPs logo após a moldagem; (b) CPs protegidas com filme; (c) CPs em imersão; (d) CP retirado da imersão; (e) leitura da retração do CP; (f) armazenagem dos CPs em ambiente controlado;	72
Figura 37 – Corpos de prova 2,5 x 2,5 x 28,5 cm (à esquerda) e 7,5 x 7,5 x 28,5 cm (à direita)...	73
Figura 38 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples	73
Figura 39 – Ensaio de módulo de elasticidade	74
Figura 40 – Ciclos para determinação do módulo.....	75
Figura 41 – Esquema geométrico do ensaio.....	76
Figura 42 – Parâmetros de cálculo	77
Figura 43 – Ensaio de resistência à tração na Flexão em ECC	78
Figura 44 – Cisalhamento Oblíquo.....	79
Figura 45 – Equipamento adaptado para o ensaio de cisalhamento oblíquo (mm).....	80
Figura 46 – Esquema geral da execução do ensaio de cisalhamento oblíquo	80
Figura 47 – Execução do ensaio de cisalhamento oblíquo e simulação no software GOM Correlate	81
Figura 48 – Projeto do modelo experimental em pequena escala	83
Figura 49 - Protótipo para validar a instrumentação indireta dos modelos.....	84
Figura 50 – Strain gages fixos na parte inferior da chapa metálica.....	85
Figura 51 – Posição dos <i>strain gages</i> : vista superior e inferior	85
Figura 52 – Modelo Experimental 1: Traço ECC _{REF}	86
Figura 53 – Modelo Experimental 2: Traço ECC _{CCA}	86
Figura 54 – Modelo experimental 2: ECC _{CCA} - Detalhes do descolamento entre o aço e o ECC..	86
Figura 55 – Modelo experimental 3: Traço ECC _{CCA}	87
Figura 56 – Execução do ensaio de mancha de areia	88
Figura 57 – Ensaio Pêndulo Britânico.....	89
Figura 58 – Resistência à compressão simples (24hrs, 3 e 7 dias) x Trabalhabilidade - Etapa 1 ..	90
Figura 59 – Resultados do ensaio de trabalhabilidade - Etapa 1	91
Figura 60 – Retração por secagem Etapa 1	92
Figura 61 – Resistência à compressão simples (3 dias) x Índice de consistência (cm) - Etapa Exploratória 2	95
Figura 62 – Trabalhabilidade dos traços avaliados na Etapa Exploratória 2.....	96
Figura 63 – Resistência à compressão simples média (ECC _{REF} x ECC _{CCA})	98

Figura 64 – Resistência à tração na flexão - 24 horas	101
Figura 65 – Resistência à tração na flexão – 3 dias.....	102
Figura 66 – Resistência à tração na flexão - 7 dias	103
Figura 67 – Resistência à tração na flexão – 28 dias.....	104
Figura 68 – Corpos de prova do traço ECC _{REF} após o ensaio de tração na flexão (24 horas).....	105
Figura 69 – Corpos de prova do traço ECC _{REF} após o ensaio de tração na flexão (3 dias)	105
Figura 70 – Corpos de prova do traço ECC _{REF} após o ensaio de tração na flexão (3 dias)	106
Figura 71 – Corpos de prova do traço ECC _{REF} após o ensaio de tração na flexão (28 dias)	106
Figura 72 – Corpos de prova do traço ECC _{CCA} após o ensaio de tração na flexão (24 horas).....	107
Figura 73 – Corpos de prova do traço ECC _{CCA} após o ensaio de tração na flexão (3 dias)	107
Figura 74 – Corpos de prova do traço ECC _{CCA} após o ensaio de tração na flexão (7 dias)	108
Figura 75 – Corpos de prova do traço ECC _{CCA} após o ensaio de tração na flexão (28 dias)	108
Figura 76 – Comparação entre os resultados de módulo de elasticidade na idade de 28 dias	112
Figura 77 – Retração (CPs 2,5 x 2,5x 28,5cm) com cura em imersão durante 28 dias:.....	114
Figura 78 – Retração livre (CPs 2,5 x 2,5 x 28,5cm): ECC _{REF} (à esquerda) e ECC _{CCA} (à direita)	114
Figura 79 – Retração livre (CPs 7,5 x 7,5 x 28,5cm): ECC _{REF} (à esquerda) e ECC _{CCA} (à direita)	114
Figura 80 – Resultados de Cisalhamento Oblíquo no plano de 40°	117
Figura 81 – Cisalhamento Oblíquo: Comportamento de ruptura frágil das amostras descritas como referência e com epóxi entre as camadas	119
Figura 82 – Cisalhamento Oblíquo: Comportamento das amostras que consideraram ranhuras+epóxi na interface entre o aço e o ECC	120
Figura 83 – Tensão de cisalhamento oblíquo x deslocamento horizontal no plano de 40°.....	121
Figura 84 – Tensão de cisalhamento oblíquo x Tempo - Dados da prensa	121
Figura 85 – Acabamento superficial do ECC _{REF} (à esquerda) e ECC _{CCA} (à direita).....	122
Figura 86 – Gráfico de deformação por retração restringida na base (µm/m) ao longo do tempo (dias) relacionado à temperatura e umidade na respectiva data de leitura dos dados do ECC _{REF}	124
Figura 87 – Gráfico de deformação por retração restringida na base (µm/m) ao longo do tempo (dias) relacionado à temperatura e umidade na respectiva data de leitura dos dados do ECC _{CCA} (Modelo 3).....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físicas da cinza de casca de arroz.....	55
Tabela 2 – Especificações da fibra de polipropileno (PP).....	57
Tabela 3 – Aditivos utilizados	58
Tabela 4 – Dados Técnicos Sikadur Epóxi.....	59
Tabela 5 - Traço ECC_{REF} em kg/m^3	61
Tabela 6 – Quantitativos relacionados à Etapa 1.....	62
Tabela 7 – Quantitativos relacionados à Etapa exploratória 2	63
Tabela 8 – Traços da Etapa Exploratória 2 em kg/m^3	64
Tabela 9 – Traços relativos à Etapa 2 em kg/m^3	64
Tabela 10 – Quantitativos relacionados à Etapa 2.....	65
Tabela 11 – Quantitativos relacionados à Etapa 3.....	67
Tabela 12 – Classes de macrotextura	87
Tabela 13 – Classes de microtextura de pavimentos.....	89
Tabela 14 – Valores de resistência à compressão simples média (MPa)	98
Tabela 15 – Resultados de resistência à tração na flexão.....	100
Tabela 16 – Módulo de elasticidade – E_{ci} (GPa).....	111
Tabela 17 – Módulo flexural - E_{cc} (GPa)	111
Tabela 18 – Resultado da macrotextura	129
Tabela 19 – Resultado do ensaio de microtextura.....	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
a/c	Relação entre água e cimento;
b	Largura da seção da viga (mm);
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente;
CCA	Cinza de Casca de Arroz;
CP(s)	Corpo(s) de Prova
CV	Cinza volante;
CM	Cura Mais
CRD	Leitura no ensaio de retração;
CV	Coefficiente de variação (CV);
DC	Daracem
DFRCC	<i>Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites;</i>
DS	Daraset 100
DSP	<i>Densified Small Particles;</i>
ECC	<i>Engineered Cementitious Composites;</i>
f_c	Resistência à compressão simples (f_c);
f	Resistência à tração na flexão (MPa);
f_i	Tensão de tração na flexão no primeiro pico de carregamento (MPa);
f_p	Tensão de tração na flexão no maior ponto de carregamento (MPa);
$f_{e,150}^D$	Tensão de tração na flexão equivalente no ponto de carregamento em L/150
FRCC	<i>Fiber Reinforced Cementitious Composites</i>
GEEA	Geradora de Energia Elétrica de Alegrete
H	Altura média da seção da viga (mm);
HDFRCC	<i>High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites;</i>
HS	Altura da mancha de areia;
JSCE	<i>Japan Society of Civil Engineers</i>
L	Largura do vão da viga (300mm);
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos – UFRGS;
LAPAV	Laboratório de Pavimentação – UFRGS;
LEME	Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – UFRGS;
LP	Liquiplast-6300

MDF	<i>Macro Defect Free;</i>
OAEs	Obras de Arte Especiais;
P ₁	Força na flexão no primeiro pico de carregamento (N);
P _P	Força na flexão no maior ponto de carregamento (N);
PP	Polipropileno;
PPECC	Traço de ECC composto por fibra de Polipropileno;
PVA	Poli-Vinil-Álcool;
PVAECC	Traço de ECC composto por fibra de Poli-Vinil-Álcool;
$R_{T,150}^D$	Relação entre a tensão residual e a tensão de primeira fissura;
RCS	Resistência à compressão simples;
RTF	Resistência à tração na flexão;
S	Área da base do corpo de prova (mm ²);
s.p.c.	Sobre Peso de Cimento Portland;
SP	Suplast 830 (SP);
T_{150}^D	Tenacidade em L/150 (J);
TF	TecFlow 8000 (TF);
VRD	Valor de resistência à derrapagem;
ΔL_x	Variação percentual do comprimento;
σ	Tensão de tração (KPa);
ϵ_{cc}	Módulo de Elasticidade (GPa);
μm	Micrômetro (10 ⁻⁶ m);
τ	Resistência ao cisalhamento (MPa);
$\rho_{\text{méd}}$	Massa específica média (g/cm ³)
α	Ângulo de cisalhamento;
δ	Deflexão (mm);
σ	Desvio Padrão;
δ_1	Deslocamento vertical no primeiro pico de carregamento (μm);
ϵ_1	Deformação na primeira fissura (mm/m)
δ_P	Deslocamento vertical no maior ponto de carregamento (μm);

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.2.	JUSTIFICATIVA	19
1.2.	OBJETIVOS	20
1.2.1.	Objetivo geral	21
1.2.2.	Objetivos específicos	21
1.3.	DELINEAMENTO DA PESQUISA	21
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	22
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1.	DESENVOLVIMENTO DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS.....	24
2.2.	<i>ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC)</i>	27
2.2.1.	Adição de material cimentício suplementar ao ECC	31
2.2.2.	Uso de aditivos no ECC	33
2.2.3.	Estudos realizados no LEME e LAPAV	34
2.3.	PROPRIEDADES RELEVANTES EM PAVIMENTOS DE CIMENTO PORTLAND.....	37
2.3.1.	Retração	38
2.3.1.1.	Tipos de retração	39
2.3.1.2.	Controle da retração do concreto	41
2.3.1.3.	Retração no ECC	42
2.3.2.	Cura	43
2.3.3.	Aderência entre as camadas do pavimento	45
2.4.	REVESTIMENTO SOBRE TABULEIROS METÁLICOS	46
2.4.1.	Estudos internacionais sobre aplicação do ECC em tabuleiros metálicos	46
2.4.2.	Ponte Mihara: Aplicação prática do ECC sobre tabuleiro metálico	50
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	52
3.1.	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	52
3.2.	MATERIAIS.....	53
3.2.1.	Cimento	53
3.2.2.	Cinza de Casca de Arroz (CCA)	54
3.2.3.	Areia	56
3.2.4.	Fibra de Polipropileno (PP)	57
3.2.5.	Aditivos	58

3.2.6.	Resina Epóxi	59
3.2.7.	Água	60
3.3.	ETAPAS EXPERIMENTAIS	60
3.3.1.	Etapa preliminar	60
3.3.2.	Etapa Exploratória 1	60
3.3.3.	Etapa 1	61
3.3.4.	Etapa Exploratória 2	63
3.3.5.	Etapa 2	64
3.3.6.	Etapa 3	66
3.3.7.	Etapa 4	68
3.4.	MÉTODOS E ENSAIOS	68
3.4.1.	Traços de ECC	68
3.4.2.	Processo de mistura e moldagem	69
3.4.3.	Trabalhabilidade	70
3.4.4.	Retração	71
3.4.5.	Resistência à compressão simples (RCS)	73
3.4.6.	Módulo de elasticidade	74
3.4.7.	Resistência à tração na flexão (RTF)	76
3.4.8.	Cisalhamento Oblíquo	79
3.5.	MODELOS	82
3.5.1.	Ensaio de Macrotextura: Altura média da mancha de areia	87
3.5.2.	Ensaio de Microtextura: Pêndulo Britânico	88
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
4.1.	Etapa 1	90
4.2.	Etapa Exploratória 2: Definição do teor de CCA e aditivos.....	95
4.3.	Etapa 2: Estudo dos traços	97
4.3.1.	Resistência à compressão simples (RCS)	97
4.3.2.	Resistência à tração na Flexão (RTF)	99
4.3.3.	Módulo de elasticidade	111
4.3.4.	Retração	113
4.4.	Etapa 3: Cisalhamento Oblíquo	116
4.5.	Etapa 4: Modelos Experimentais	122
4.5.1.	Avaliação visual dos modelos	122
4.5.2.	Análise das deformações por retração restringida na base e aderência dos	

modelos	123
4.5.3. Avaliação da Macrotextura e Microtextura	128
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.1. CONCLUSÕES	131
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	135
REFERÊNCIAS	137
APÊNDICE A – Dados complementares das leituras de massa nos ensaios de retração livre e por secagem dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA}	145

1. INTRODUÇÃO

A partir do século XIX, com o desenvolvimento da indústria siderúrgica moderna e produção do aço, elementos metálicos de infraestrutura começaram a ser amplamente utilizados em todo o mundo. Dentre estes, destacam-se os elementos de infraestrutura viária, como as pontes e viadutos, os quais são conhecidos como obras de arte especiais (OAE's) e têm como finalidade transpor barreiras, sejam elas naturais ou construídas, como um rio ou avenida, por exemplo.

Assim como em outros locais no mundo, o Brasil possui numerosas obras de infraestrutura compostas por tabuleiros metálicos, principalmente no âmbito rodoviário e ferroviário. Nas estruturas pavimentadas o revestimento comumente executado é o concreto asfáltico. Entretanto, este material apresenta comportamento viscoelástico, ou seja, seu módulo de deformação é termosensível e dependente da velocidade de aplicação de carga, apresentando suscetibilidade à fissuração quando exposto a temperaturas muito altas ou baixas. Nestas condições, manifestações patológicas precoces podem ser visualizadas, como trincas e panelas, tornando necessária a manutenção mais frequente deste tipo de revestimento.

Segundo Ma *et al.* (2018), na China e na Coreia fissuras prematuras podem ser observadas no pavimento de diversas pontes metálicas executadas com concreto asfáltico. Essas manifestações patológicas podem ser justificadas pelo comportamento viscoelástico do concreto asfáltico combinado com as vibrações que ocorrem nos tabuleiros metálicos devido a passagem dos veículos de carga. Desta forma, é necessária a construção do revestimento destas estruturas com materiais que acompanhem a deformabilidade do aço e que resistam aos mecanismos de degradação de misturas asfáltica, como resistência à fadiga e a deformação permanente.

Considerando as deficiências de alguns materiais em termos de resistência e capacidade de suportar as deformações, ao longo dos anos diversas pesquisas foram desenvolvidas para adaptar os concretos convencionais para diversas aplicações (RIGHI, 2015), como para utilização em elementos de infraestrutura viária. Assim surgiram os *Engineered Cementitious Composites* (ECC), também conhecidos como *High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites* – HDFRCC, os quais são compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras que proporcionam a este material elevada ductilidade.

O ECC foi desenvolvido na década de 90 baseado em conceitos da micromecânica, de forma a resistir a elevadas tensões de tração e de cisalhamento. Essa característica se deve ao fato deste material ser capaz de resistir a grandes deformações de tração sem colapsar e à capacidade de

desenvolver múltiplas fissuras de pequena magnitude quando submetido a este tipo de carregamento, comportamento conhecido como *strain hardening* (LI, 2019). Além destas propriedades mecânicas, este material possui a capacidade de diminuir, ou até selar, as fissuras dependendo da sua abertura, característica definida como *self healing* (ZHANG; HU; MA, 2019).

Em relação à composição do ECC, essa é associada a traços com elevado teor de cimento, com uma proporção de aproximadamente 2 a 3 vezes maior que o concreto convencional (GARCEZ, 2009). Assim, como alternativa para redução de custos e impactos ambientais, muitos estudos nacionais e internacionais consideram a substituição parcial do cimento por outro material pozolânico, como cinza de casca de arroz (CCA) ou cinza volante (CV), por exemplo (RAUT; DEO, 2015; RIGHI, 2015; COSTA, 2015; MA; QUIAN; LI, 2016; RODRIGUEZ, 2018). A adição destes materiais suplementares cimentícios também pode provocar uma diminuição da rigidez da matriz cimentícia, contribuindo com a capacidade de múltipla fissuração desse tipo de compósito.

O Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) em conjunto com o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) vem trabalhando ao longo dos anos em pesquisas que definem um traço adequado para o uso do ECC na pavimentação. Estes estudos consideram a modificação dos componentes descritos na dosagem original do ECC por materiais locais, como substituições parciais do cimento por cinza de casca de arroz e também o uso de fibra de Polipropileno (PP), a qual é comercializada no Brasil, em substituição à fibra Poli-Vinil-Álcool (PVA).

1.2. JUSTIFICATIVA

Os conceitos expostos permitem considerar o ECC como um material atual e com propriedades promissoras, apresentando aplicabilidade em diferentes áreas. Dentre essas, cita-se sua possibilidade de utilização em reforços estruturais, sistemas de proteção contra incêndio, estruturas sujeitas a vibrações, barragens, elementos de infraestrutura, dentre outros (LI, 2019).

Como alternativa à pavimentação asfáltica em elementos metálicos de infraestrutura, o ECC apresenta capacidade de acompanhar as deformações devido as vibrações da superfície metálica e os deslocamentos devido as oscilações térmicas que ocorrem neste tipo de estrutura. A propriedade de *strain hardening*, exibida por este tipo de compósitos, proporciona o aumento

da resistência à tração após o material atingir o pico da curva de tensão-deformação no regime elástico, fazendo com que a estrutura sofra múltipla microfissuração e suporte assim maiores solicitações à tração.

Outra característica que viabiliza a aplicação do ECC como pavimento de tabuleiros metálicos é a propriedade de autosselagem das trincas (*self healing*). Segundo Zhang *et al.* (2019) a fissuração em revestimentos, independentemente de sua constituição, é inevitável, sendo as aberturas variáveis. Essas fissuras criam um caminho preferencial para a penetração de água e de outros agentes agressivos. Dessa forma, o ECC surge como um material que proporciona a impermeabilização necessária para que a água não penetre e permaneça entre o tabuleiro e o revestimento, favorecendo assim a degradação do pavimento.

Dentre as vantagens econômicas, o uso do ECC na pavimentação permite a adoção de menores espessuras de camada que o concreto asfáltico convencional e, mesmo apresentando uma matriz cimentícia de maior densidade, proporciona a redução do peso próprio quando aplicado como revestimento em elementos de infraestrutura metálicos. Também, conforme relatado por Garcez (2009), existe uma diminuição dos custos ao longo prazo e aumento da vida útil da estrutura, pois o uso deste tipo de material tende a demandar menos manutenção que um pavimento usual.

Por fim, devido à carência de trabalhos internacionais e brasileiros sobre a aplicação prática e teórica do ECC como camada de revestimento sobre tabuleiros metálicos, torna-se de suma importância a análise deste tema, especialmente em relação à aderência entre os componentes e à retração do composto cimentício. A avaliação destas propriedades é de grande relevância na pavimentação para evitar trincas devido ao deslizamento horizontal entre as camadas, no caso de superfícies não aderidas, e fissuras associadas aos diferentes processos de retração, especialmente no caso de restrições mecânicas impostas a esse fenômeno. Da mesma forma, justifica-se o estudo da cura acelerada do ECC quando este é aplicado em elementos de infraestrutura viária, sejam estas de concreto convencional ou metálicas, as quais necessitam que a liberação do tráfego de veículos deva ser realizada o mais rápido possível.

1.2. OBJETIVOS

A seguir serão descritos os objetivos geral e específicos propostos que nortearam o desenvolvimento deste trabalho.

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar a viabilidade da aplicação do *Engineered Cementitious Composites* (ECC) como pavimento de tabuleiros metálicos, avaliando o comportamento do material em termos de cura acelerada, aderência ao aço e retração.

1.2.2. Objetivos específicos

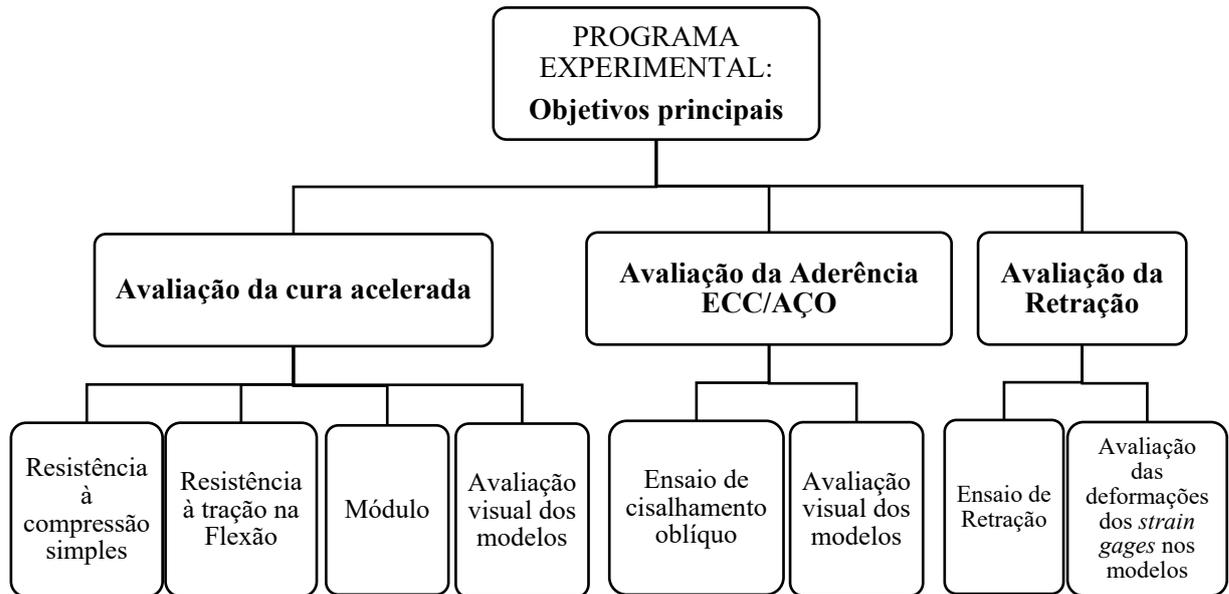
Como objetivos específicos, citam-se:

- Determinar, com base no traço de ECC desenvolvido no LEME, a combinação de agentes superplastificante e acelerador de cura e seus respectivos teores de adição, de modo a proporcionar uma boa trabalhabilidade, resistência à compressão e retração livre ao material;
- Avaliar as propriedades mecânicas e de retração livre e por secagem dos traços de ECC, com e sem a incorporação de CCA, considerando a adição do superplastificante e acelerador de cura;
- Verificar a melhor estratégia para promover aderência entre o ECC e a superfície metálica, através da realização de ensaio de cisalhamento oblíquo variando os métodos que proporcionam adesão entre os materiais;
- Executar modelos de pequena escala instrumentados para avaliação da cura e a aderência do ECC;
- Analisar as deformações sofridas pelos modelos de pequena escala devido à retração restringida na base;

1.3. DELINEAMENTO DA PESQUISA

Este estudo propôs analisar a aplicação do ECC, com e sem incorporação de CCA em substituição parcial ao cimento, como pavimento de tabuleiros metálicos, verificando as propriedades de cura acelerada, aderência e retração. Para tanto, foram adicionados aos traços de ECC, além do superplastificante convencionalmente utilizado, um agente acelerador de pega para promover uma maior resistência mecânica nas primeiras idades. Da mesma forma, foram ensaiadas diferentes estratégias para promover aderência entre o ECC e o tabuleiro metálico. O esquema abaixo, representado na Figura 1, apresenta um resumo global para entendimento do programa experimental, exibindo os objetivos principais deste estudo, e os respectivos ensaios que permitiram a análise destas variáveis de interesse

Figura 1 – Objetivos principais do programa experimental



Fonte: Autora

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos principais. Inicialmente, no Capítulo 1, é introduzido e justificado o tema de estudo. Também são apresentados os objetivos principal e específicos que embasaram o programa experimental.

O Capítulo dois apresenta uma revisão bibliográfica que descreve a evolução dos compostos cimentícios, desde seu surgimento até a aplicação específica sobre tabuleiros metálicos, destacando-se especialmente as referências consideradas mais relevantes para o desenvolvimento desta dissertação.

Em seguida, o capítulo 3 descreve o método de pesquisa empregado, o qual foi dividido em quatro etapas principais e duas exploratórias. Neste item são apresentados e caracterizados os materiais utilizados para compor o traço de ECC, os quantitativos adotados e descritos os procedimentos de moldagem. Também são detalhados os ensaios realizados de acordo com as respectivas normas técnicas ou referências literárias.

A apresentação e análise dos resultados é descrita no capítulo quatro, onde são discutidas e justificadas as respostas experimentais obtidas para os traços de ECC avaliados, validando ou não a sua aplicação sobre tabuleiros de aço.

O capítulo cinco expõe as principais conclusões levantadas durante análise dos resultados e desenvolvimento experimental, respondendo os objetivos propostos no início da dissertação. Por fim, são realizadas sugestões para estudos futuros com base nas lacunas e perguntas não respondidas ao longo deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contextualiza os conceitos importantes para o desenvolvimento da pesquisa, trabalhos relevantes ao tema desenvolvidos tanto UFRGS, como no mundo, e descreve aplicações práticas do ECC.

2.1. DESENVOLVIMENTO DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS

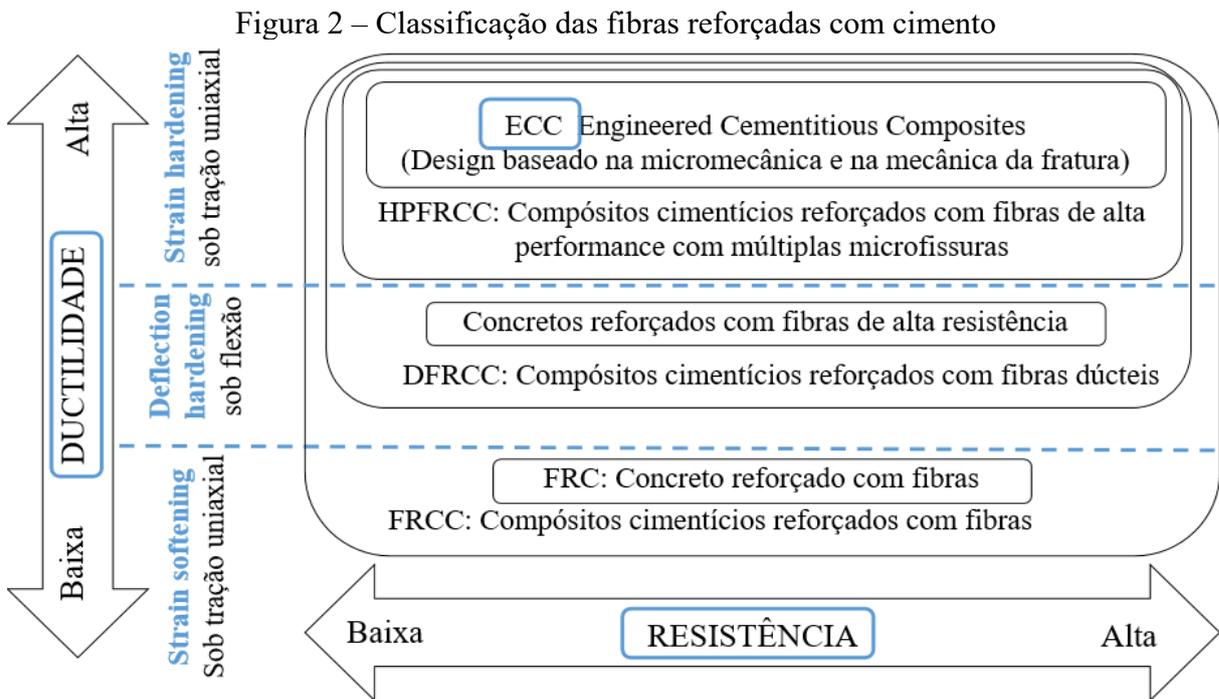
Desde o desenvolvimento do concreto como material estrutural, esse material está em constante evolução para melhorar as suas características mecânicas de modo a cumprir sua funcionalidade esperada em campo. V. Li (2019) descreve que na década de 1950 a resistência máxima à compressão do concreto era de 30 a 40 MPa, enquanto em 1989 passou a ser de até 130 MPa. Este aumento da capacidade de suporte do material foi associado, principalmente, à necessidade de construção de estruturas convencionais e de infraestrutura mais esbeltas e em menor tempo.

No final do século XX, buscando potencializar a resistência mecânica das estruturas, desenvolveram-se concretos modificados através de duas abordagens principais. A primeira resultou na criação do *Densified Small Particles – DSP*, um material com poucos vazios, baixa relação água/aglomerante, uso de agregado de alta resistência, adição de superplastificantes e sílica ativa. A segunda abordagem considerou o desenvolvimento de argamassas modificadas por polímeros, descritas como *Macro Defect Free - MDF* (RODRÍGUEZ, 2018). Embora ambos os materiais concebidos atinjam resistências satisfatórias, não existe a garantia de que o colapso da estrutura não ocorra, especialmente se essa for solicitada à tração. Ainda, considerando a comparação entre o concreto convencional e os de alta resistência, esses últimos se mostram mais quebradiços e, assim, são mais susceptíveis à falha súbita (LI V., 2019).

Considerando o comportamento frágil à ruptura apresentado pelos DSP e MDF, estudou-se a combinação entre estes materiais, adicionando fibras ao DSP. Assim surgiram os compostos cimentícios convencionais reforçados com fibras, denominados *Fiber Reinforced Cementitious Composites* (FRCC), e os de alto desempenho, definidos como *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* (HPFRCC). Estes são associados à uma elevada ductilidade, apresentando-se como uma evolução do desempenho intermediário quando submetido a tensões de tração dos *Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites* (DFRCC) (JSCE, 2008).

Ainda, buscando ampliar a maleabilidade dos HPFRCC sem aumentar o teor de adição de fibras, surgiram os *Engineered Cementitious Composites* (ECC), também denominados *High*

Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites (HDFRCC). Estes materiais possuem bom comportamento tanto à compressão como à tração, característica que contrapõe o déficit exibido pelos concretos convencionais (JSCE, 2008). A Figura 2 exibe uma classificação dos compostos cimentícios reforçados com fibras por grupos, de acordo com a *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE).

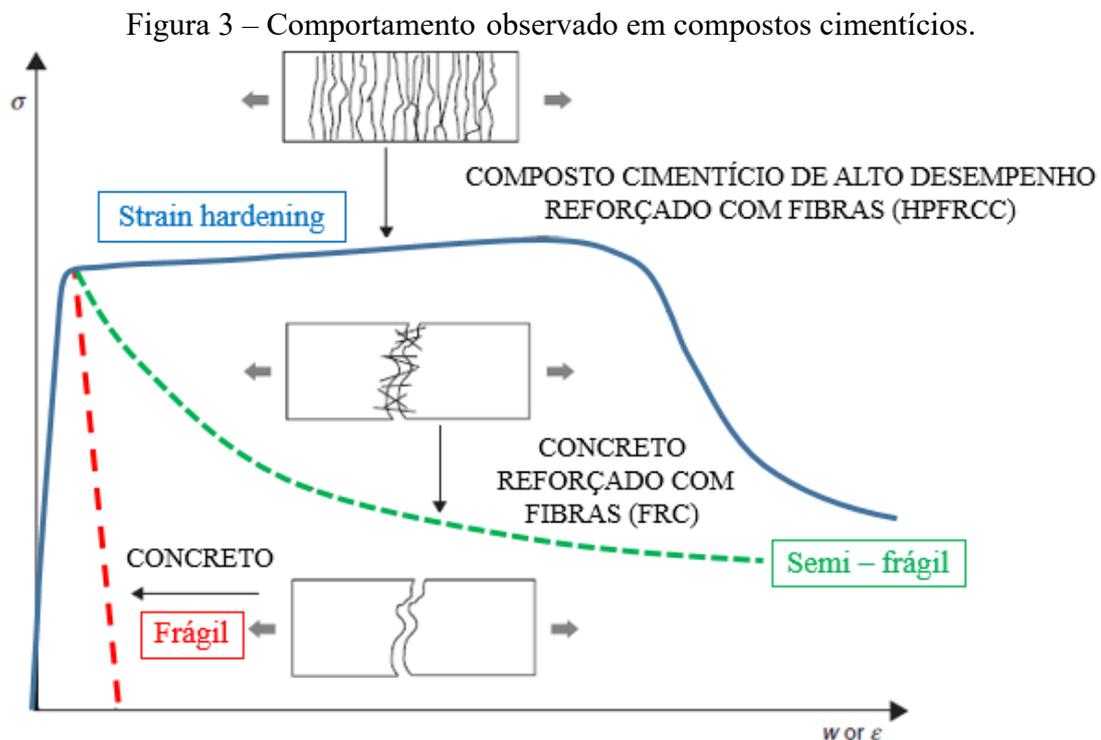


Fonte: Adaptado de Japan Society of Civil Engineers - JSCE (2008)

Tendo em vista a subdivisão apresentada na Figura 2 e analisando a ruptura dos compostos cimentícios, V. Li (1998) define três diferentes tipos de comportamento, conforme demonstra a Figura 3. Materiais frágeis, como o concreto convencional, apresentam linearidade na curva tensão-deformação, caracterizando-se por uma queda brusca na capacidade de suporte com o surgimento da primeira fissura na estrutura. Compostos semi-frágeis, como os FRCs, exibem um relaxamento após o rompimento, desempenho justificado pela ação individual ou conjunta das ligações entre os agregados, cimento e fibras. Observa-se que, tanto para materiais frágeis, como para os semi-frágeis, ocorre um decréscimo na tensão de tração após a primeira fratura, desempenho denominado como *strain softening* (JSCE, 2008).

Os materiais que manifestam o comportamento de ruptura à tração determinado como *strain hardening*, são caracterizados pela capacidade de suportar níveis crescentes de tensão após sofrerem a primeira fissura, alcançando uma deformação significativamente maior que os demais compostos cimentícios. Naaman (2008) descreve que o *strain hardening* é uma

propriedade desejável em todos os materiais, geralmente acompanhada de múltipla fissuração e grande capacidade de absorção de energia. Dentre os compostos que apresentam esta característica, destaca-se o *Engineered Cementitious Composites* (ECC).

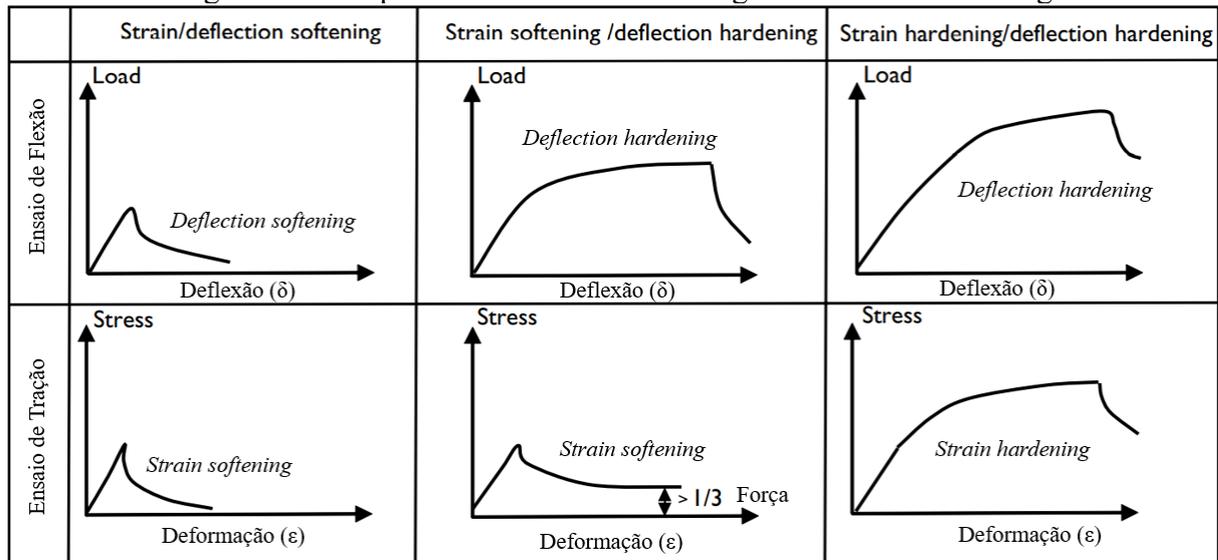


Fonte: Adaptado de M. Li (2014)

Ainda, grande parte dos compostos dúcteis denominados *Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites* (DFRCC), apresentados na Figura 2, também demonstram um acréscimo de deformação quando submetidos ao aumento da tensão de flexão, comportamento definido como *deflection hardening*. Naaman (2008) menciona que, assim como o *strain hardening*, o *deflection hardening* implica que a tensão de flexão máxima após a primeira fissura é maior do que a tensão na primeira fissura na flexão, e que a múltipla fissuração geralmente ocorre após a abertura da primeira fissura.

Bentur e Mindess (2008) mencionam que materiais com propriedades *strain hardening* à tração também apresentam comportamento *deflection hardening* quando submetido à flexão, conforme mostra a Figura 4. Entretanto, nem todo composto com comportamento à flexão *deflection hardening* demonstra *strain hardening* quando submetido à tração. Neste caso, o composto pode ser caracterizado como *strain softening* à tração e *deflection hardening* à flexão se o material exibir uma resistência residual à tração na parcela pós fissurada superior a 1/3 da resistência à tração da matriz.

Figura 4 – Comportamento Strain hardening x Deflection hardening



Fonte: Bentur e Mindess (2008)

2.2. ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC)

O *Engineered Cementitious Composite* (ECC) vem sendo desenvolvido desde 1990 pelo grupo de pesquisa de materiais cimentícios avançados (ACE-MRL), liderado pelo professor Victor C. Li, na *University of Michigan* em Ann Arbor – EUA (LI V., 1998). Este compósito pertence a ampla classe de concretos reforçados com fibras (*Fiber Reinforced Concrete – FRC*) e sua criação foi idealizada para superar as deficiências exibidas pelo concreto sem armadura, em especial, a falta de resistência à tração e fragilidade. Assim, devido as características que o ECC apresenta, estes materiais também são denominados como *bendable concretes*, ou seja, “concretos flexíveis” (RODRÍGUEZ, 2018).

Conforme V. Li (2019), a concepção do ECC é significativamente diferente dos concretos de alta resistência ou ultra performance, os quais são projetados com base no empacotamento de partículas. O autor menciona que a microestrutura do ECC é sistematicamente ajustada para que ocorra interações sinérgicas entre os componentes, conceito fundamentado na micromecânica. Ou seja, a composição deste composto é idealizada para que as fibras, a matriz cimentícia e a interface entre a fibra e a matriz cimentícia interajam entre si quando o material é submetido ao carregamento.

Os conceitos de micromecânica e mecânica da fratura proporcionaram ao ECC uma matriz cimentícia com um percentual de adição de fibras otimizado, normalmente cerca de 2% ou menos em relação à composição total em volume do ECC (LIM., 2014). Sua composição básica

é constituída de cimento, agregado miúdo, fibras e aditivo para promover trabalhabilidade, podendo ser variada conforme a necessidade. Dentre as principais propriedades deste material, destacam-se a elevada absorção de energia e a alta capacidade de deformação sob carregamento de tração crescente, formando múltiplas fissuras de pequena abertura, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 – Múltipla fissuração de viga composta por ECC.



Fonte: V. Li (2019)

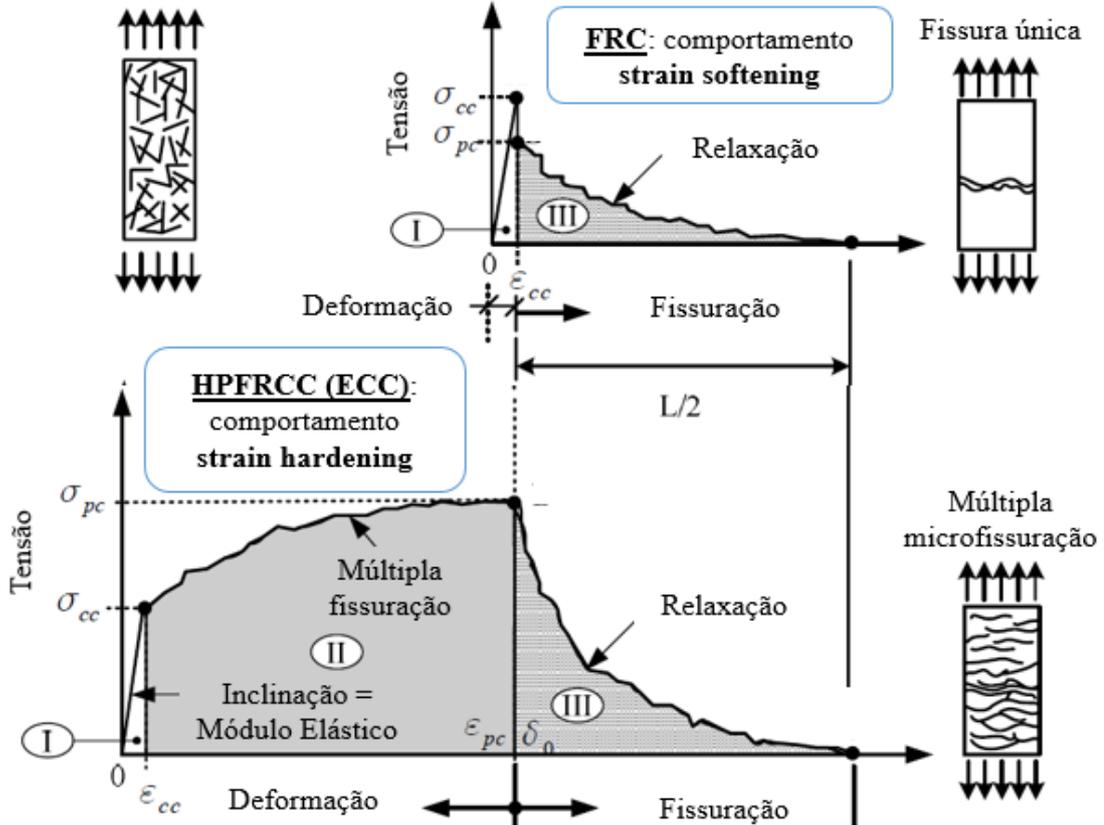
Diferentemente do concreto reforçado por fibras (FRC), o qual exibe comportamento de relaxação, ou seja, *strain softening*, ao ser submetido ao carregamento à tração, o ECC apresenta capacidade de se deformar após atingir o pico da curva de tensão-deformação, aumentando a sua resistência à proporção que crescem as deformações, formando microfissuras (*strain-hardening*). Esta característica, segundo Garcez (2009), garante alta ductilidade ao material, permitindo elevadas deformações à tração sem que a estrutura colapse.

A Figura 6 mostra o comportamento típico da curva de tensão-deformação e de fissuração, comparando ensaios realizados com FRC e HPFRCC, material que exibe as mesmas propriedades que o ECC. Naaman (2008) descreve que a curva típica de tensão-deformação do ECC inicia com uma parcela ascendente íngreme (parte I), seguida por um enrijecimento da matriz cimentícia até um ponto de pico (parcela II) onde ocorre uma relaxação (parte III).

O comportamento *strain hardening* no ECC é garantido pela interação das interfaces entre a fibra e a matriz cimentícia quando o material é submetido ao carregamento, realizando a distribuição da carga absorvida para uma grande quantidade de fibras, as quais possuem boa resistência à tração (LI V., 2019). Esse mecanismo de transferência se repete durante todo o processo de solitação do material, permitindo assim a formação de múltiplas microfissuras. Dessa forma, devido a estas características, Weimann e Li (2003) descrevem que a capacidade de deformação à tração do ECC, em geral, é de 3% à 5%, superando em cerca de 100 vezes o

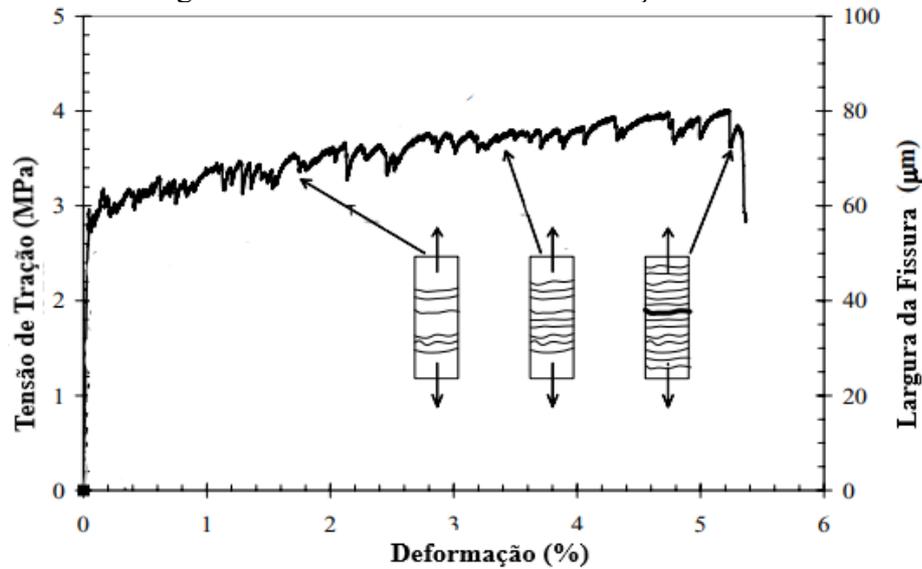
concreto convencional. O processo de microfissuração do ECC à medida que aumenta a tensão de tração pode ser visualizado através da Figura 7, assim como a largura de abertura das fissuras em micrômetros (μm).

Figura 6 – Curva de Tensão- Deformação



Fonte: Adaptado de Naaman (2008)

Figura 7 – Curva de tensão x deformação do ECC



Fonte: Adaptado de Weimann e Li (2003)

De acordo com Li (2008), o comportamento à flexão do ECC também reflete a sua ductilidade à tração. Assim como no ensaio de tração direta, quando o ECC é submetido à flexão ocorre um aumento na deformação a medida que o material é solicitado, característica descrita como *deflection hardening*. Conforme apresentado na Figura 5, durante o carregamento, os corpos de prova de ECC desenvolvem uma curvatura na região da base devido ao processo de microfissuras.

O ECC também é caracterizado pela sua capacidade de autorreparação das trincas desenvolvidas durante sua solitação, diminuindo a abertura ou selando completamente estas fissuras, propriedade denominada de *self-healing*. Zhang *et al.* (2019) mencionam que o comportamento de *self-healing* do ECC proporciona a recuperação das propriedades mecânicas do material e da capacidade de suportar altas deformações, resultando valores similares aos anteriores ao estado fissurado.

Para que o *self-healing* ocorra é necessário que o material fissurado seja exposto ao meio ambiente e que este possua a presença de componentes químicos reativos à água. A capacidade de autorreparação dos materiais é limitada ao tamanho das fissuras, delimitando assim o fechamento parcial ou total dessas. No caso do ECC, a reatividade à água é proporcionada pela existência de material anidro oriundo da hidratação incompleta do cimento, permitindo que este compósito possa apresentar o comportamento de autosselagem de suas fissuras (GARCEZ, 2009).

M. Li (2014) descreve que as propriedades desejadas para um composto de ECC podem ser alcançadas através da variação do design da microestrutura juntamente com a adaptação da reologia. Assim, o autor menciona que o ECC não possui uma constituição com componentes e proporções fixas, sendo este totalmente versátil e adaptável de acordo com os materiais disponíveis localmente e com as características mecânicas necessárias.

Considerando os custos e o ciclo de vida associados às estruturas compostas por ECC, estes exibem um investimento de produção inicial cerca de 300% superior ao concreto comum (KROUMA; SYED, 2016). Esta diferença é associada, em grande parte, ao emprego das fibras e do alto teor de consumo de cimento dos traços de ECC (GARCEZ, 2009). Entretanto, embora inicialmente este composto demonstre desvantagens econômicas, os benefícios financeiros a longo prazo podem ser considerados maiores, pois o emprego deste material proporciona redução da manutenção ao longo da vida da estrutura. Ainda, os custos do ECC podem ser

reduzidos considerando um traço sustentável, o qual incorpora resíduos suplementares cimentícios com propriedades pozolânicas na composição (KROUMA; SYED, 2016).

2.2.1. Adição de material cimentício suplementar ao ECC

Neville (2016) descreve os materiais cimentícios suplementares com propriedades pozolânicas como resíduos naturais ou artificiais que contém sílica em sua composição, os quais se tornam reativos apenas quando moídos e submetidos à presença de água em temperatura ambiente. Nestas condições, a sílica presente nestes materiais reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, o qual é produzido na hidratação do cimento Portland, formando silicatos de cálcio estáveis e, assim, exibindo propriedades cimentícias. Pozolanas compostas por sílica vítrea demonstram baixa reatividade, sendo desejável materiais que apresentam sílica amorfa em sua matriz.

Dentre os materiais suplementares cimentícios conhecidos, destaca-se a cinza de casca de arroz (CCA), a cinza volante (CV) oriunda da queima do carvão, a escória de alto forno produzida em siderúrgicas, a sílica ativa proveniente da produção do silício metálico e do fumo, a cinza oriunda da produção de óleo de palma, dentre outras (Figura 8). Visto que grande parte desses materiais é proveniente de rejeitos industriais, a incorporação destes em substituição parcial ao cimento Portland exibe um caráter ambiental, além de tornar os compostos cimentícios, muitas vezes, mais atraentes economicamente. Da mesma forma, a adição desses materiais influencia na granulometria da mistura, podendo contribuir com melhoria do empacotamento das partículas e redução da porosidade do concreto.

O traço de ECC requer elevados teores de cimento, cerca de 1000 kg para produção de um metro cúbico de material, e dessa forma, muito estudos buscam estratégias para a redução deste consumo. Diferentes pesquisas sobre o uso de materiais pozolânicos incorporados parcialmente ao ECC, como cinza de casca de arroz e cinza volante, apresentaram viabilidade de aplicação (GARCEZ, 2009; COSTA, 2015; RIGHI, 2015; RODRÍGUEZ, 2018; COSTA et. al, 2019; YANG, 2008 WANG; LI, 2006). De forma semelhante, a consideração de constituintes alternativos também pode ser vantajosa em relação à diminuição das fissuras e a retração do ECC, como ocorreu no trabalho desenvolvido por Yang (2008), o qual considerou o uso de cinza volante na composição do material.

Figura 8 – Materiais suplementares cimentícios com propriedades pozolânicas



Fonte: Adaptado de KANAMARLAPUDI *et al.* (2020)

As pozolanas apresentam influência nas propriedades do composto tanto no estado fresco, quanto endurecido. Choucha *et al.* (2017) desenvolveram um estudo na Argélia sobre o efeito da substituição de altos teores de cimento por materiais suplementares cimentícios pozolânicos de origem natural no ECC. Os autores citam que todas as misturas analisadas obtiveram módulos de elasticidade baixos, os quais são desejáveis para diminuir as tensões internas provocadas pela retração. Entretanto, em relação à análise mecânica, o uso de altos percentuais deste tipo específico de material necessitou de um maior tempo para as reações de pega, reduzindo a resistência à compressão e flexão, em especial em idades mais baixas.

MA *et al.* (2016) analisaram as propriedades mecânicas e de *self-healing* do ECC com incorporação de cinco tipos diferentes de cinzas volantes oriundas da queima do carvão, as quais foram coletadas de distintas usinas e exibiam variadas composições químicas e granulométricas. Como resultados mecânicos, os autores citam que os traços compostos com materiais suplementares cimentícios com alto teor de cálcio e pequenas partículas exibiram as resistências à compressão mais elevadas. Em relação a resistência à tração, as melhores respostas foram associadas ao ECC com incorporação de cinzas compostas granulometricamente por partículas de tamanho intermediário.

2.2.2. Uso de aditivos no ECC

Os aditivos proporcionam melhorias econômicas e físicas nos compostos cimentícios, considerando ganhos de resistência e consistência nos materiais, tanto no estado fresco quanto endurecido. As dosagens dos diversos tipos de aditivos são normalmente expressas como uma porcentagem relacionada à massa de cimento adicionada na mistura, a qual é recomendada pelo fabricante, apresentando variações de acordo com a finalidade desejada (NEVILLE, 2016).

No estado fresco, o ECC sem adições apresenta uma consistência densa com alta plasticidade, pouca fluidez e de difícil manuseio. Esta característica é relacionada à elevada proporção de finos em relação ao baixo teor de água de amassamento e ao acréscimo das fibras, necessitando de um agente reativo que auxilie na trabalhabilidade da mistura. Estudos comprovam que, para melhorar a trabalhabilidade e a dispersão das fibras do ECC sem aumentar a relação água/cimento, pode ser incorporado à composição do material um aditivo superplastificante. Esse funciona como redutor de água e possui sua dosagem baseada no recomendado pelo fabricante e em um abatimento satisfatório (LI V., 2019; RODRÍGUEZ, 2018; RIGHI *et al.*, 2017; COSTA, 2015; CASAGRANDE, 2012; LI *et al.*, 1994). A Figura 9 mostra a melhoria da trabalhabilidade do ECC com a incorporação de superplastificante à mistura.

Figura 9 – Melhoria da consistência do ECC com a adição de superplastificante



Fonte: Yildirim; Özgür; Mustafa (2018)

V. Li (2019) descreve que a viscosidade da argamassa, o tipo de fibra e a energia de cisalhamento da mistura possui fortes efeitos na dispersão das fibras em um traço de ECC. Fibras hidrofóbicas, como o polipropileno (PP), não fornecem uma força físico-química para melhorar o espalhamento das fibras, sendo necessário assim a incorporação de

superplastificante à mistura. Entretanto, o mesmo autor cita que usar uma quantidade excessiva deste aditivo pode provocar atrasos na hidratação da mistura.

Outros aditivos podem ser introduzidos na dosagem do ECC para melhoria de suas características físicas. Gao *et al.* (2018) avaliaram o impacto da incorporação combinada de aditivo para diminuir a retração, sem efeito redutor de água, e do superplastificante convencionalmente introduzido ao ECC, nas propriedades mecânicas e de retração por secagem do material. Conforme esperado, os autores encontram melhores resultados de retração quando considerada a incorporação de ambos os aditivos nas misturas em comparação a adição apenas de superplastificante.

De forma semelhante, outros estudos mostram a viabilidade da incorporação de modificadores de pega para acelerar o ganho de resistência dos compostos cimentícios de alto desempenho (LI V., 2019; ZHANG *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2018). Neville (2016) destaca que é necessário ter cuidado com a adição de agentes aceleradores de pega, pois em altas temperaturas pode ocorrer ruptura por retração dos elementos devido ao aumento da liberação de calor.

2.2.3. Estudos realizados no LEME e LAPAV

O Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) e o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) vêm trabalhando, ao longo dos anos, em pesquisas conjuntas considerando adaptações no traço do ECC para a condição brasileira, através do uso de materiais locais e do emprego de alternativas ambientais. Destacam-se as teses de doutorado publicadas desenvolvidas por Estela Oliari Garcez (2009) e Camilo Munõz Rodriguez (2018), as quais avançaram nos estudos relacionados à aplicação do ECC como camada de restauração de pavimentos. Da mesma forma, evidenciam-se as dissertações de mestrado de Débora Righi (2015) e de Fernanda B. P. Costa (2015), as quais abordam a substituição parcial de cimento Portland por Cinza de Casca de Arroz (CCA) e a durabilidade do material, respectivamente. Por fim, em nível de graduação, citam-se os trabalhos desenvolvidos por Édina Casagrande (2012) e Vanessa Pasinato (2018) sobre a viabilidade de aplicação do ECC para diferentes áreas.

Iniciando as pesquisas, Garcez (2009) estudou a possibilidade de substituição das fibras de Poli-Vinil-Álcool (PVA), convencionalmente utilizadas na composição original do ECC (PVAECC), pelo uso de Polipropileno (PP), considerando a aplicação do material como camada de recapeamento de pavimentos. Esta fibra é comumente comercializada no Brasil e, portanto,

torna a produção do ECC mais viável economicamente, reduzindo o custo de manufatura do composto. A alternativa proposta pela autora, descrita como PPECC, obteve resultados viáveis, mantendo-se o comportamento dúctil característico do material e proporcionando a diminuição da abertura média das fissuras, possibilitando assim o aumento da durabilidade da estrutura.

Garcez (2009) também analisou o comportamento à flexão e à fadiga do ECC constituído com fibra de Polipropileno, obtendo melhores resultados para os compósitos produzidos com cimento Portland tipo CP I comparados aos executados com o tipo CP V-ARI. A partir dos dados gerados, um modelo para estimativa da vida útil de camadas de restauração de pavimentos foi desenvolvido comparando estruturas compostas de concreto, PVAECC e PPECC, indicando que o ECC requer espessuras de camadas até 2,5 vezes menores que as de concreto convencional. Por fim, a autora realizou uma avaliação dos custos associados ao ciclo de vida de quatro tipos de sistemas de recapeamento, destacando como conclusão que o recapeamento de pavimentos flexíveis com ECC é promissor, demonstrando vantagens econômicas, ambientais e funcionais.

Com base na tese de Garcez (2009), Casagrande (2012) desenvolveu um estudo para avaliar a aplicação de ECC como revestimento de pavimentos, sendo esse composto por cerca de 2% de fibras de polipropileno em relação ao volume total da mistura e com substituição parcial do cimento por cinza volante. Através dos resultados dos ensaios de flexão, os quais foram analisados através de três metodologias diferentes, abrasão superficial e trabalhabilidade, a autora concluiu que o traço de ECC avaliado pode ser considerado uma alternativa viável para pavimentos de concreto.

De modo a adaptar os componentes originais do ECC buscando uma produção mais econômica e ambientalmente sustentável, Righi (2015) focou seus estudos na viabilidade da substituição parcial em volume do cimento Portland pela CCA sem controle de queima e moída em laboratório, considerando o uso da fibra de polipropileno (PP). Analisando os resultados do estudo, a autora verificou que o traço composto de 30% de CCA em substituição em volume ao cimento se mostrou satisfatório em relação à mistura de referência, sendo viável a sua utilização para restauração de pavimentos flexíveis.

Costa (2015) buscou analisar a durabilidade dos compostos cimentícios de alta ductilidade realizando uma comparação entre o traço de ECC utilizado por Righi (2015), com e sem incorporação de 30% de CCA sem controle de queima, com o concreto convencional. Neste

estudo a autora avaliou a estrutura dos poros dos materiais, a penetração e difusão de íons por cloretos, a retração livre e restringida e a resistência à abrasão. Como resultados, a incorporação de CCA no ECC foi considerada viável em termos de durabilidade, exibindo boa resistência à abrasão e redução da penetração de cloretos. Entretanto, em relação à retração restringida, observaram-se fissuras de maior magnitude nos compósitos com CCA.

Rodríguez (2018) realizou a análise laboratorial e prática da aplicação do ECC composto por fibra de polipropileno, com e sem substituição parcial de 30% do cimento por CCA sem controle de queima, para o uso em recapeamento de pavimentos. O autor dividiu os estudos em duas etapas. A primeira etapa constituiu-se na caracterização das propriedades mecânica em laboratório dos traços de ECC, através da análise da trabalhabilidade e da execução dos ensaios de aderência por cisalhamento direto, resistência à tração na flexão, resistência à compressão e fadiga em viga de quatro pontos. Observa-se que a avaliação da trabalhabilidade foi de suma importância para aprimorar o manuseio do material no estado fresco e validar o uso de betoneiras de tombo para execução em campo. Ainda, com os resultados dos ensaios dinâmicos, foram propostos modelos para previsão de dano por fadiga de cada traço de ECC, os quais foram baseados nos dados de deformação, tensão inicial e energia dissipada.

Na segunda etapa, Rodríguez (2018) realizou a aplicação do ECC em escala real sobre um pavimento de concreto asfáltico, conforme mostra a Figura 10. Foram executadas duas camadas de recapeamento: uma de 5 cm sem considerar a substituição parcial de cimento por 30% de CCA sem controle de queima e outra de 3 cm considerando a incorporação de material cimentício suplementar. Ambas as camadas foram submetidas a um carregamento de 100 mil ciclos com carga de semieixo de 5,5 toneladas com auxílio do simulador de tráfego do Laboratório de pavimentação (LPAV). Durante o carregamento, o autor acompanhou visualmente as manifestações patológicas que ocorreram ao longo do processo, como o surgimento de fissuras, e realizou ensaios de microtextura e macrotextura (Pêndulo Britânico e Macha de areia, respectivamente).

Ainda, para verificação da reflexão de fissuras e da aderência entre as camadas, ao final dos ciclos realizados com o simulador de tráfego foram serradas placas para análise. Como conclusão geral da tese, Rodríguez (2018) constatou que é possível produzir ECC com materiais locais e que este é viável como alternativa para restauração de pavimentos, sendo a sua funcionalidade esperada associada ao controle do processo de produção e a análise da aderência entre o ECC e a camada inferior.

Figura 10 – Recapeamentos executados por Rodriguez (2018)



Fonte: Rodríguez (2018)

Buscando a adequação do ECC como material para reparo em estruturas armadas, Pasinato (2018) avaliou as propriedades mecânicas de vigas de concreto armado convencional e de vigas expostas à corrosão da ferragem, ambas reparadas com este composto cimentício. Neste estudo, considerou-se um traço de ECC composto por fibras de polipropileno e a substituição do cimento por 50% de cinza de casca de arroz. Como resultados, a autora verificou que as vigas reparadas com ECC não exibiram variações na resistência mecânica, mantendo aproximadamente a carga de ruptura original do mesmo sistema sem reparos. Também, observou-se boa aderência entre as vigas e o composto cimentício. Entretanto, essa metodologia de reparo não apresentou a trabalhabilidade esperada e a viabilidade econômica necessária para justificar sua aplicação prática.

2.3. PROPRIEDADES RELEVANTES EM PAVIMENTOS DE CIMENTO PORTLAND

Este item descreve as propriedades que devem ser avaliadas na execução e construção de pavimentos de compostos cimentícios, em especial, os construídos sobre tabuleiros metálicos. Nos subitens a seguir serão expostos os conceitos e particularidades da retração do concreto, do processo de cura e da necessidade de aderência entre as camadas do pavimento.

2.3.1. Retração

A retração do concreto é conhecida como o processo de alteração de volume resultante da movimentação da água do interior da matriz para o exterior dos materiais constituídos por aglomerantes minerais, em especial, os compostos por cimento Portland. Esse processo de perda de água pode ocorrer por movimentação ascendente da água para a superfície (exsudação), pela evaporação, carbonatação ou hidratação do cimento. Durante a contração dos compostos cimentícios, são induzidas forças de tração na matriz, as quais podem ser responsáveis por deformações, ou fissurações, quando o concreto apresenta resistência inferior a estes esforços (RACENA, 2014).

O progresso da retração ocorre de maneira lenta e de forma gradativa, da superfície para o interior do concreto. Como este fenômeno inicia na região superficial, sua magnitude se relaciona com as dimensões dos elementos, mostrando-se uma função da relação de superfície/volume. O aumento da relação água/cimento dos compostos cimentícios tende a aumentar a retração e diminuir as propriedades mecânicas do material, assim como as variações de temperatura e umidade podem provocar tensões internas e resultar na fissuração dos elementos (NEVILLE, 2016). Da mesma forma, Padilha e Adami (2021) descrevem que a retração é influenciada, principalmente, pela geometria da estrutura, pelo traço do concreto e pelas condições climáticas.

Os compósitos cimentícios são constituídos pelos agregados e pela pasta. A pasta é um elemento aglutinante composto de cimento, água e ar, sendo susceptível ao fenômeno da retração e afetada diretamente pela relação água/cimento. Ao contrário da pasta, os agregados promovem uma influência restritiva em relação à retração, influenciando nas propriedades mecânicas do concreto e promovendo a estabilidade de volume (RACENA, 2014). Neville (2016) cita que a dimensão e a granulometria dos agregados não influenciam a magnitude da retração, porém partículas maiores possibilitam composições com menores teores de cimento e, assim, menores manifestações volumétricas relacionadas à retração. Desta forma, torna-se interessante projetar um concreto com mais agregados do que pasta, afim de diminuir a retração (RACENA, 2014).

Considerando as condições do contorno, a retração pode ser considerada livre, em uma situação em que a variação volumétrica ocorre sem limitações, ou restringida, quando existe uma barreira que impede o fenômeno. De acordo com V. Li (2019), a retração provoca o

“encolhimento” dos elementos de concreto e, quando este processo é restringido, são provocadas forças de tensão direta para restaurar o comprimento original do elemento. Se esses esforços de tração excederem a resistência do material, fissuras irão surgir.

Quanto a relação água/cimento, adições de altos teores de água na mistura podem prejudicar o desempenho do concreto devido ao aumento de porosidade. Da mesma maneira, baixas incorporações de água na mistura, relativas a menores relações água/cimento, são capazes de provocar problemas na hidratação das partículas do cimento devido à secagem rápida da argamassa, não existindo água em quantidade suficiente para conclusão das reações que garantem a resistência mecânica do material. Dessa forma, o desenvolvimento microestrutural responsável pelas propriedades endurecidas do concreto é prejudicado, diminuindo sua performance mecânica esperada (RIBEIRO, 2021).

2.3.1.1. Tipos de retração

Os processos físicos e químicos que originam as variações de volume nos compostos cimentícios podem ser classificados de diferentes formas. Destacam-se a retração plástica, a retração por secagem, a retração autógena, a retração diferencial, a retração por carbonatação e a retração térmica.

A retração plástica, segundo Neville (2016), dá-se devido à perda da água superficial do concreto no estado fresco durante a pega enquanto o material ainda se encontra no estado plástico. Este processo é influenciado diretamente pelas características do ambiente, como umidade e temperatura, e pela rigidez da mistura. Quando a quantidade de água perdida pela matriz é superior à ascensão da água para a superfície (exsudação), elevadas tensões de tração são desenvolvidas nos poros capilares, levando à fissuração plástica.

As fissuras por retração plástica são observadas, em grande parte, em estruturas com uma grande área superficial, devido à evaporação da água da superfície (QI; OLEK, 2003). Balbo (2009) descreve que, para pavimentos de concreto, esse fenômeno é prejudicial e necessita ser controlado, podendo causar danos estruturais ao revestimento, conforme ilustra a Figura 11. Ainda, em relação à intensidade do processo, Neville (2016) cita que a retração plástica é maior quanto maior for o consumo de cimento e menor a relação água/cimento.

Figura 11 – Fissuras por retração plástica em pavimento de concreto



Fonte: DNIT

A retração por secagem, ou hidráulica, é caracterizada pela perda de água do concreto não saturado para o ambiente, sendo comum em estruturas de grandes dimensões. Esse processo decorre após o endurecimento do material e subsequente ao início das reações químicas de cristalização do cimento, ou seja, da pega. Quando as forças de tração provocadas pela secagem excedem a resistência à tração do concreto, ocorre a ruptura da estrutura com o aparecimento de fissuras, as quais podem ser de grande abertura dependendo da intensidade do fenômeno (RACENA, 2014).

Mindess *et al.* (2002) descrevem que, considerando a retração resultante da secagem dos elementos de concreto, a resposta da pasta à perda de umidade é modificada pela presença de agregado e pela forma das estruturas. Os autores mencionam que, dentre os fatores que afetam este fenômeno, destacam-se os parâmetros da pasta, do concreto e do ambiente. Em meio a estes, citam-se a temperatura de cura, a porosidade e idade da pasta, os aditivos incorporados, o percentual e tamanho dos agregados, a espessura do concreto, o tempo de secagem, entre outros.

A retração autógena, associada à retração por secagem, ocorre durante a hidratação do cimento devido à saída da água dos poros capilares do cimento não hidratado, reduzindo seu volume. A fissuração provocada por este processo tende a aumentar em ambientes com temperaturas elevadas e com traços com grandes quantidades de cimento e, também, quando estes possuem uma granulometria mais fina. Ainda, esse fenômeno é considerado relativamente pequeno, exceto para relações água/cimento muito baixas e para elementos que apresentam grandes superfícies de exposição (NEVILLE, 2016).

De acordo com MINDESS *et al.* (2002), a retração por carbonatação, da mesma forma que a retração autógena, é considerada um caso especial de retração por secagem, o qual ocorre quando hidróxido de cálcio reage com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. NEVILLE (2016), também descreve o fenômeno como um processo químico que decorre na superfície do concreto devido a decomposição de cristais de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sob esforços de compressão impostos durante a secagem, e pelo depósito de carbonato de cálcio (CaCO_3) em locais livres de solicitações.

A retração diferencial, ocorre nos compostos cimentícios devido à formação de um gradiente de umidade decorrente da evaporação não uniforme, com a perda da água apenas na superfície durante a secagem do elemento. Essa tendência de comportamento assimétrico faz com que sejam geradas tensões de tração próximas à região superficial e de compressão no interior do concreto, podendo ocorrer fissuração (NEVILLE, 2016).

Por fim, Balbo (2009) descreve a retração térmica com um fenômeno que ocorre devido à liberação de calor provocada pelo acréscimo de temperatura oriundo das reações de hidratação do concreto nas idades iniciais, causando a expansão do material, a qual é absorvida pela fluência da massa fresca. Esse processo é decorrente em pavimentos com grandes proporções de cimento e ligantes hidráulicos, os quais provocam elevado calor de hidratação. Ainda, o autor cita que o controle da retração térmica pode ser realizado evitando um diferencial térmico entre a superfície e o núcleo do elemento de concreto, sendo importante a realização da cura apropriada do material.

2.3.1.2. Controle da retração do concreto

A retração é um fenômeno natural, desta forma não pode ser impedida. Entretanto, existem medidas que podem ser adotadas para diminuir ou retardar sua ocorrência, evitando rupturas precoces. Inúmeras estratégias vêm sendo desenvolvidas para reduzir o potencial de fissuração de concretos devido à retração plástica, dentre as quais se citam a variação das proporções da mistura e métodos de cura e também a adição de fibras (QI; OLEK, 2003).

Balbo (2009) menciona que o controle da retração plástica de pavimentos de concreto pode ser realizado através de alguns procedimentos, como a incorporação de aditivos retardadores de evaporação e o cobrimento com lona plástica do material lançado, a fim de diminuir a perda precoce da água superficial. O autor também indica a utilização de fibras na composição do

concreto, como ocorre no ECC, com objetivo de aumentar a ductilidade da massa. Da mesma forma, o controle das deformações de retração também pode ser realizado através da seleção de agregados de granulometria graúda, os quais provocam restrições para a ocorrência do fenômeno nos compostos cimentícios.

Qi *et al.* (2003) realizaram, através da análise semi-automatizada de imagens e de uma abordagem estatística, a caracterização da fissuração desenvolvida devido à retração plástica de compostos de concreto reforçados com fibras. Os autores mencionam que a habilidade das fibras de reduzir a retração é associada a suas características de resistência, ao seu comprimento e área de superfície. Dessa forma, foram analisadas misturas de ECC com o acréscimo de dois tipos diferentes de fibra de polipropileno. Dentre os resultados para ambos os compósitos, um aumento no percentual de fibras proporciona redução das fissuras e, para um teor ideal de adição, ocorre o surgimento de aberturas secundárias de menor dimensão, reduzindo significativamente a largura total cumulativa das fissuras.

Estudos mostram que a incorporação de fibras e de materiais com propriedade pozolânicas ao cimento provocam uma interação positiva, promovendo a redução da retração por secagem (KARAHAN; ATIS, 2011; RAUT; DEO, 2015). Zhang *et al.* (2020) descrevem que as fibras de Polipropileno (PP) são utilizadas para mitigar fissuras induzidas pelos fenômenos de retração. Raut e Deo (2015) realizaram uma revisão do efeito da adição de cinza volante, oriunda do carvão, e de fibras no concreto, obtendo a redução da retração plástica devido ao acréscimo destes materiais. Por fim, os autores mencionam que a inclusão de fibras proporciona, além da melhoria das propriedades mecânicas do material, uma barreira para a abertura das fissuras geradas pela retração por secagem.

2.3.1.3. Retração no ECC

O ECC apresenta um desempenho mecânico considerado superior em comparação com o concreto convencional. Devido à elevada proporção de cimento, o ECC induz forças de retração por secagem severas, as quais podem exceder de 2 a 3 vezes as que ocorrem em elementos comuns de concreto. Entretanto, a retração deste material pode ser reduzida devido à adição de fibra (GAO *et al.*, 2018).

M. Li (2014) descreve que a capacidade de deformação por tração do ECC é cerca de duas vezes maior que a deformação por retração não restringida e, portanto, esse material é capaz de acomodar esta solicitação para suprimir fissuras localizadas. Entretanto, de forma oposta, a

limitação da retração no ECC provoca esforços de tração que, se excederem a resistência do material, provocam fissuração indesejada. Ainda, outra preocupação se relaciona ao fato de que o ECC não possui agregados graúdos em sua constituição, os quais auxiliam na redução do encolhimento do material.

A incorporação de materiais suplementares cimentícios com características pozolânicas ao ECC, como a cinza de casca de arroz ou cinza volante, pode promover melhorias no processo de retração do material. Zhang *et al.* (2009) avaliaram a influência de diferentes matrizes cimentícias de ECC, cujo objetivo foi desenvolver um composto com baixa retração por secagem, pequena abertura de fissuras e alta capacidade de resistência à tração. Para análise da retração foram executados ensaios com e sem restrições laterais, enquanto para resistência mecânica foram ensaiados corpos de prova sob tração uniaxial. Como resultados, os autores desenvolveram um novo traço de ECC considerado viável em termos de múltipla microfissuração, resistência à tração, sendo essa de cerca de 4 a 5 MPa, e também de retração por secagem, com valores cerca de 7 vezes inferiores que o ECC tradicional aos 28 dias.

GAO *et al.* (2018) desenvolveram um estudo para reduzir a tensão de retração por secagem do ECC tradicional, avaliando o efeito da incorporação de aditivo redutor de retração comparado ao efeito de um agente expansivo. Os autores também analisaram a influência do percentual de cinza volante e dos diferentes teores dos materiais incorporados à composição do ECC na retração e na resistência à tração de 18 diferentes traços. Como resultado, destaca-se que a deformação provocada pelo processo de retração diminui com o aumento de cinza adicionado, agente expansivo e aditivo redutor.

Zhang *et al.* (2020) mencionam que as fibras de Polipropileno (PP) apresentam alta densidade e são comumente utilizadas na composição de compostos cimentícios de alto desempenho. Especificamente para o ECC, as fibras de polipropileno são menos eficientes que as fibras Poli-Vinil-Álcool (PVA) no controle da abertura de fissuras, sendo necessário um tratamento superficial adequados nas fibras PP para promover a funcionalidade desejada.

2.3.2. Cura

Neville (2016) define cura como os processos de controle de temperatura e de movimentação da água que promovem a hidratação do cimento, influenciando diretamente nas características de pega e endurecimento do concreto. Este conjunto de fenômenos deve manter a pasta do concreto, composta de água e cimento, com umidade suficiente para que os vazios preenchidos

com água do material no estado fresco sejam completos pelos produtos oriundos das reações químicas da hidratação. Em resumo, para que se obtenha um concreto com as propriedades esperadas, deve-se realizar a cura da estrutura em um ambiente com condições apropriadas, evitando assim a evaporação prematura da água.

Balbo (2009) cita que a cura dos pavimentos de cimento Portland influencia, especialmente, a durabilidade do revestimento. Quando o processo de cura é realizado de forma inadequada, esse é responsável por uma menor resistência mecânica e à abrasão da camada de rolamento. Ainda, a evaporação da água provoca a retração plástica e por secagem na camada superficial. Dessa forma, prevenir a perda de água do concreto é necessário para não diminuir a capacidade do material de desenvolver a resistência e o módulo de elasticidade esperado, para evitar os processos de retração e o aumento da permeabilidade e diminuir a abrasão superficial (NEVILLE, 2016).

Grande parte das fissuras que ocorrem durante os primeiros dias, após a construção do revestimento de concreto, estão relacionadas ao método de cura adotado (WANG; CABLE; GE, 2006). Considerando as variadas metodologias de cura passíveis de aplicação, a seleção do procedimento é dependente do tipo de concreto e da necessidade prevista na obra. Da mesma forma, para que a cura seja considerada adequada, é importante diminuir a evaporação da água nas primeiras idades, a qual é associada a variações da temperatura, da umidade do ar, a presença de vento, entre outros aspectos, em maioria, ambientais.

Dentre os métodos e materiais de cura que podem ser aplicados em pavimentos de concreto, citam-se a aspersão de água na superfície, o emprego de mantas ou têxteis umedecidos, a utilização de lonas plásticas, a aplicação de compostos formadores de membranas líquidas, dentre outros (WANG; CABLE; GE, 2006). Considerando esses métodos, no Brasil, adota-se convencionalmente o uso de mantas umedecidas, denominada de cura úmida, e produtos pulverizados sobre o concreto fresco lançado (cura química), os quais promovem uma barreira impermeável para a evaporação superficial (BALBO, 2009). Estes procedimentos podem ser aplicados de forma combinada ou individual, conforme mostra a Figura 12.

Figura 12 – Aplicação de métodos de cura úmida (à esquerda) e cura química (à direita) em rodovias diferentes



Fonte: DOC (2012)

Balbo (2009) também menciona que a retração plástica pode ser diminuída com o umedecimento da superfície durante as primeiras 24 horas após a execução, especialmente em ambientes com temperaturas altas e pouca umidade, os quais são considerados de maior criticidade. Além disso, assim como comumente empregado na Europa, pode-se utilizar tendas para proteção das manifestações climáticas, como da radiação solar direta e do vento.

2.3.3. Aderência entre as camadas do pavimento

A aderência entre superfícies é relacionada a um mecanismo aglutinador entre diferentes materiais. Na engenharia civil, essa propriedade é de suma importância, dado que promove o assentamento de blocos de alvenaria e de revestimentos cerâmicos através do emprego da argamassa, por exemplo. Da mesma forma, a deficiente adesão entre as barras de aço e o concreto em estruturas armadas pode provocar o colapso devido à deficiência de ancoragem, ou seja, de aderência entre os materiais (PEREIRA, 2003).

O pavimento, seja ele constituído de concreto comum, reforçado com fibras ou material asfáltico, é uma estrutura composta por camadas, as quais necessitam uma ligação para que funcionem como um sistema único e assim promovam uma melhor distribuição das tensões e deformações. Para materiais de revestimento e base que apresentam diferentes módulos de elasticidade, o fluxo de veículos atuante irá provocar esforços de cisalhamento na área de interação entre as camadas. Caso a resistência nesta interface suporte as tensões impostas, a estrutura irá trabalhar aderida, considerando o equilíbrio de solicitações (PEREIRA, 2003).

A ligação entre as camadas do pavimento interfere na vida útil de serviço da estrutura (GUIMARÃES, 2013). Huang (2004) cita que quando não existe aderência entre as camadas, estas funcionam como lajes independentes que se deformam de forma desconectada no eixo horizontal. Desta forma, o autor destaca a importância do estudo da aderência entre as camadas para que a estrutura apresente o desempenho esperado.

As manifestações patológicas associadas à falta de aderência entre as camadas dos pavimentos ocorrem, em geral, nos locais de frenagem e aceleração dos veículos devido às solicitações horizontais impostas. Dentre os defeitos que ocorrem devido à falta de adesão entre os materiais, destacam-se as trincas por deslizamentos horizontais entre as superfícies e as deformações horizontais (SANTOS; ASSIS; FERNANDES, 2019).

Considerando pavimentos de concreto de cimento Portland sob uma base cimentada, ambos com elevada rigidez, a aderência entre as camadas é afetada por um conjunto de fatores. Dentre estes, menciona-se a granulometria dos agregados da composição, a qual demonstra melhores resultados quando graúda, o tipo do cimento, a metodologia de cura empregada, a temperatura no momento da concretagem, o método de preparação da superfície de base, dentre outros (PEREIRA, 2003).

2.4. REVESTIMENTO SOBRE TABULEIROS METÁLICOS

Na China e no Japão, os tabuleiros metálicos são amplamente utilizados devido as suas propriedades de alta resistência, menor peso da estrutura e capacidade de vencer longos vãos. O revestimento sobre estas estruturas possui uma resposta mecânica diferente de um pavimento sobre um subleito, sendo necessário a adoção de materiais com alto desempenho, bom comportamento frente às solicitações impostas, resistência às trincas e deformações e boa durabilidade. Desta forma, o ECC surge como uma alternativa de aplicação nestes elementos, visto que exhibe as características citadas (Zhang *et al.*, 2019).

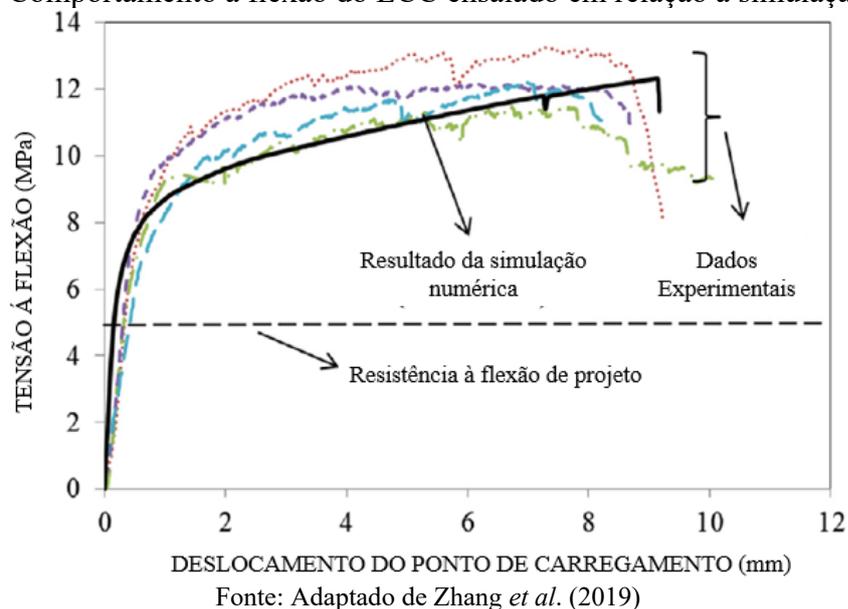
2.4.1. Estudos internacionais sobre aplicação do ECC em tabuleiros metálicos

Zhang *et al.* (2019) publicaram um estudo desenvolvido na China sobre a viabilidade da aplicação do ECC como revestimento de uma ponte metálica de vão longo. Neste trabalho, analisaram-se 4 espessuras diferentes de um mesmo traço de ECC, comparando os resultados laboratoriais de resistência à tração e flexão das amostras com as respostas fornecidas pela

simulação numérica, obtida através do software de elementos finitos *Abaqus*. Os autores também verificaram a capacidade de *self-healing* do compósito, analisando o seu comportamento em relação à permeabilidade de água e à difusão de cloretos. Para isso, foram realizados ensaios em amostras anteriormente submetidas ao ensaio de flexão, ou seja, corpos de prova em um estado de pré-fissuração, caracterizando a condição de campo.

Quanto aos resultados laboratoriais obtidos, o ECC apresentou múltipla fissuração sob carga de fadiga, alta capacidade de deformação à tração e maior resistência à flexão e à fadiga em relação ao concreto convencional. As resistências máximas à compressão e flexão obtidas para o ECC foram de 45,8 MPa e 12,1 MPa, respectivamente, satisfazendo os requisitos chineses para pavimentos projetados para tráfego pesado. A capacidade de deflexão do material também foi considerada suficiente para acomodar as deformações sofridas pela estrutura metálica mediante ação dos veículos, tanto na modelagem quanto nos resultados experimentais. A Figura 13 mostra a comparação do comportamento à flexão do ECC considerando os dados experimentais e da simulação numérica.

Figura 13 – Comportamento à flexão do ECC ensaiado em relação à simulação numérica.



Com relação à análise numérica da variação de espessuras da camada de ECC, Zhang *et al.* (2019) mencionam que essa apresenta pouco impacto na distribuição das tensões longitudinais. Dessa forma, seria possível a aplicação prática da camada de 40 mm de ECC sobre o tabuleiro metálico, diminuindo os custos e o peso próprio da estrutura. Por fim, os autores concluíram que, devido às propriedades mecânicas deste traço específico de ECC e a sua capacidade de

self-healing, este material foi considerado viável como revestimento de tabuleiros metálicos, diminuindo a necessidades de manutenção e aumentando a vida útil do pavimento.

Outro trabalho desenvolvido na China por Ma *et al.* (2018) trata-se um estudo sobre a aderência entre um traço de ECC com média resistência inicial (MES-ECC) com um tabuleiro de uma ponte metálica de vão longo. Os autores realizaram um programa experimental considerando carregamento estático e uma modelagem numérica da estrutura pelo método de elementos finitos com auxílio software *Athena*, a qual considerou a aplicação de uma carga quase-estática.

Foram estabelecidas duas metodologias para proporcionar adesão entre o ECC e o deque metálico, uma considerando o uso de resina epóxi, e outra contrapinos soldados na superfície metálica. Para mensuração da aderência considerando a fixação das camadas com resina epóxi, realizou-se o ensaio de cisalhamento oblíquo, no qual foram variadas as dosagens de resina (0,4 l/m², 0,6 l/m² e 0,8 l/m²) e as temperaturas (0°, 23° e 60°). Da mesma forma, para verificar a aderência do ECC e do tabuleiro através de contrapinos fixos ao aço, utilizou-se a metodologia *push-out*. Ainda, foi avaliada a resistência mecânica do ECC em termos de compressão, tração e comportamento à flexão.

Como resultados, os autores concluíram que a aplicação do traço de MES-ECC, proposto como revestimento de tabuleiro metálicos, é considerada viável, principalmente em relação à aderência. O material estudado apresentou alta ductilidade e maior resistência e capacidade de deformação à tração quando comparado ao concreto convencional. As resistências máximas à compressão e à flexão obtidas em um período de cura de 3 dias foram satisfatórias, cerca de 26 MPa e 8 MPa, respectivamente, permitindo assim diminuir o tempo de construção do revestimento e de restrição ao tráfego de veículos. Em relação à ligação entre o ECC e o tabuleiro metálico, o uso da cola epoxy se mostrou uma alternativa eficiente, com uma dosagem ideal entre 0,4 e 0,6 l/m² considerando a variação de temperatura.

Comparando os dados obtidos através dos ensaios laboratoriais e da simulação numérica, o menor resultado experimental encontrado para a tensão de cisalhamento foi maior que a máxima tensão simulada obtida através do software, descrita como tensão teórica. Além disso, os valores obtidos através da simulação numérica para a tensão de tração máxima e para o deslocamento vertical da camada MES-ECC foram muito menores que os resultados encontrados experimentalmente. Assim, os autores concluíram como sendo possível o uso do material em revestimento de tabuleiros metálicos.

De forma semelhante à Ma *et al.* (2018), Wu *et al.* (2020) avaliaram a viabilidade do uso de resina epóxi para promover a colagem de um pavimento de ECC moldado *in loco* com um deque de uma ponte metálica de vão longo. Os autores realizaram ensaios convencionais para verificação das propriedades mecânicas do material e, para avaliação da aderência, foram realizados ensaios de cisalhamento, simples e oblíquo, e também *pull-off*, conhecido como ensaio de arrancamento de argamassas.

Neste estudo, os ensaio de cisalhamento simples e o *pull off* avaliaram os efeitos dos ciclos de congelamento e descongelamento e do envelhecimento hidrotérmico nas propriedades interfaciais entre o aço e ECC. O cisalhamento oblíquo, simulou condições consideradas próximas as reais, sendo realizado em diferentes inclinações para representar a ação combinada de forças verticais e horizontais na ligação entre o aço e o ECC, avaliando assim variados estados de tensões.

Como conclusões, WU *et al.* (2020) descreveram que a colagem do ECC fresco ao aço com auxílio do epóxi foi considerada viável para tabuleiros metálicos, podendo aumentar a vida útil da estrutura. Considerando os resultados do cisalhamento e o *pull off*, a resistência na interface dos materiais diminuiu com o acréscimo do número de ciclos de congelamento/descongelamento e da duração do envelhecimento hidrotérmico, ocorrendo aumento dos defeitos interfaciais, o que também pode ser visualizado através da avaliação de imagens microscópicas. Por fim, a tensão de cisalhamento encontrada na interface entre os materiais foi linear à tensão normal, sendo o critério de falha encontrado semelhante ao descrito pelo critério de Mohr-Coulomb.

Continuando os estudos iniciados por WU *et al.* (2020) sobre a aplicação de ECC sobre uma ponte metálica com uso de resina epóxi, HAN *et al.* (2021) avaliaram a ruptura na região de interface entre estes materiais através de ensaios laboratoriais e simulação numérica, observando a taxa crítica de liberação de energia e a distribuição desigual dessa frente à zona de ruptura. Ainda, de forma destacada, os autores realizaram uma análise da pressão hidrodinâmica gerada nas fissuras interfaciais do revestimento de ECC, através de um modelo tridimensional bidirecional sólido/fluído. As fissuras analisadas ocorrem devido à água acumulada na superfície durante o tempo de serviço do pavimento submetido ao carregamento gerado pelos veículos. Como resultado, observa-se que a tenacidade à fratura na interface entre o aço e o ECC é maior que a pressão hidrodinâmica, sendo assim, dificilmente essa força poderia gerar a ruptura entre dos materiais, podendo apenas causar fadiga na região de interface.

2.4.2. Ponte Mihara: Aplicação prática do ECC sobre tabuleiro metálico

O desenvolvimento de compósitos cimentícios não se torna completo sem a aplicação prática destes materiais e o seu acompanhamento em campo. Em 2004, em Hokkaido no Japão, foi construída uma ponte estaiada metálica com aproximadamente 20.000 m² de área de tabuleiro, a qual foi pavimentada com uma camada de 38 mm de ECC (M. LI, 2014). A Figura 14 mostra a ponte Mihara, no Japão, executada com revestimento de ECC.

Figura 14 – Ponte Mihara (Hokkaido, Japão).



Fonte: Li (2019)

Segundo Kunieda e Rokugo (2006) para a execução do pavimento sobre a ponte Mihara, o ECC foi misturado e transportado até o local por grandes caminhões agitadores e submetido a uma segunda mistura no canteiro de obras (Figura 15). Em relação à aderência entre a estrutura metálica e o revestimento, elementos especiais foram fixos ao tabuleiro, conforme é ilustrado na Figura 16.

Figura 15 – Execução do ECC na Ponte Mihara



Fonte: M. Li (2014)

Figura 16 – Tabuleiro metálico da ponte Mihara.



Fonte: V. Li (2019)

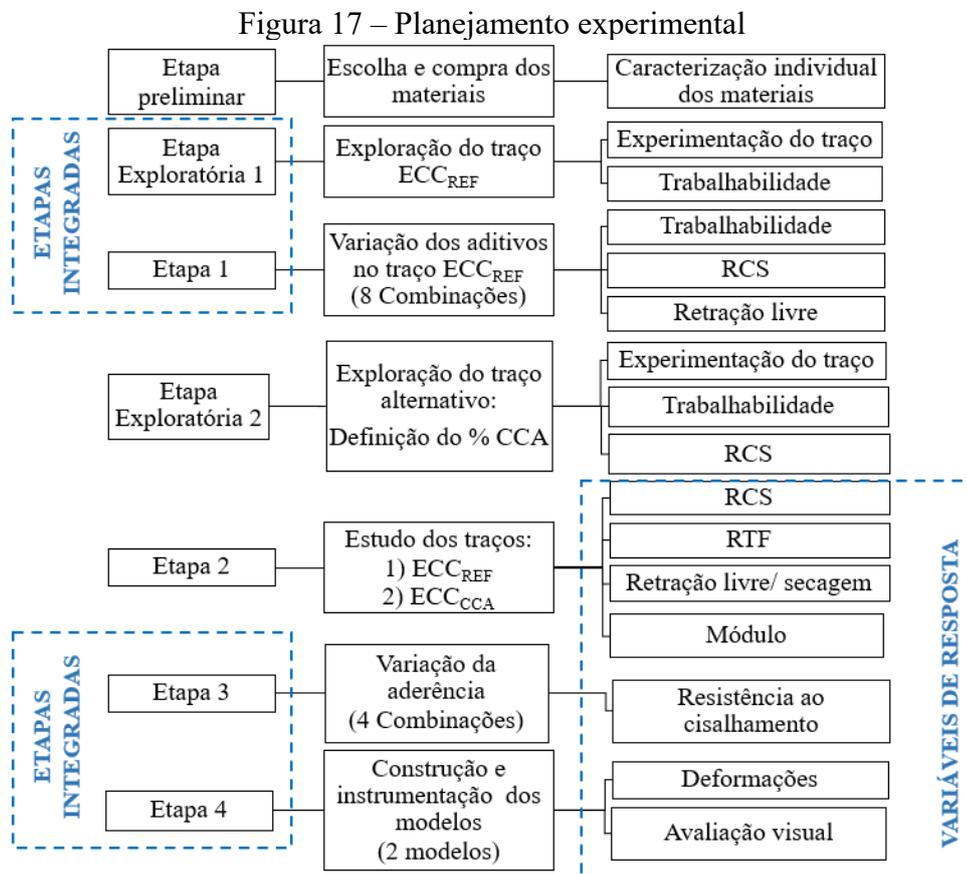
M. Li (2014) menciona que a opção pela pavimentação da ponte com ECC, além de proporcionar maior durabilidade e controle do processo de fissuração, provocou uma redução de cerca de 40% do peso total da estrutura. Ainda, o autor cita que, considerando a vida útil prevista para a estrutura de 100 anos, o ciclo de vida associado aos reparos e às manutenções necessários devem ser consideravelmente menores que para tabuleiros com pavimento de concreto asfáltico convencional.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste item foram descritos o planejamento, os materiais e os métodos experimentais utilizados para alcançar os objetivos.

3.1. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental utilizado deste estudo é apresentado na Figura 17, sendo subdividido em quatro etapas principais, além de uma fase preliminar e duas exploratórias. Para cada uma destas foram definidas variáveis de interesse e metodologias experimentais, passos descritos nos itens seguintes. Buscando-se avaliar a aplicação do ECC em tabuleiros metálicos, as respostas verificadas neste estudo englobam a trabalhabilidade, as retrações livre e por secagem, o módulo de elasticidade, a tensão de cisalhamento oblíquo e as resistências à compressão (RCS) e à tração na flexão (RTF). Considerando os modelos experimentais em pequena escala, os parâmetros analisados serão o comportamento durante o processo de cura, a condição superficial dos revestimentos, a aderência visual entre os materiais e as deformações provocadas pela retração restringida na base.



Fonte: Autora

3.2. MATERIAIS

Neste item serão apresentados os materiais utilizados na produção dos traços de ECC, os quais englobam cimento, Cinza de Casca de Arroz (CCA), areia fina, fibra de Polipropileno (PP), aditivos, resina epóxi e água.

3.2.1. Cimento

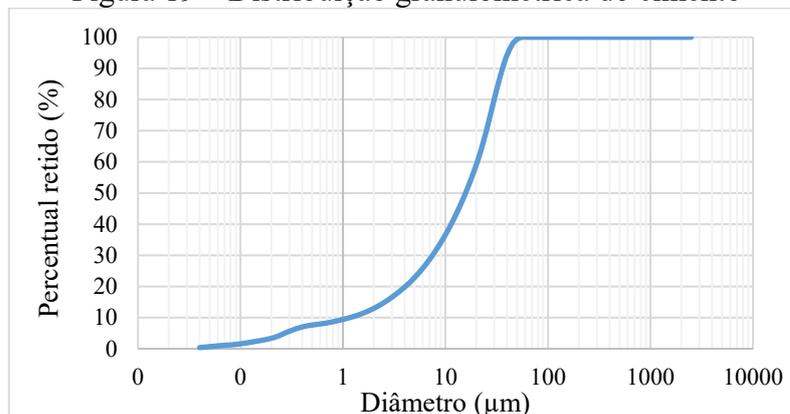
O cimento Portland adotado corresponde ao CP V-ARI RS (Figura 18), o qual exibe alta resistência inicial e é regulamentado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da norma NBR 16697:2019. Segundo o fabricante, este material apresenta resistências médias à compressão simples de 22,8 MPa, 36,3 MPa e 45,7 MPa em 24 horas, 3 e 7 dias, respectivamente. Essa resistência é relacionada a dosagem de calcário e argila presentes neste cimento, a qual permite a produção de um percentual elevado de aluminatos no clínquer, e também pela finura do material, resultado de uma moagem mais intensa. A distribuição granulométrica do cimento foi realizada no laboratório de materiais cerâmicos da UFRGS (LACER) através da granulometria a laser. A curva granulométrica obtida é apresentada na Figura 19, sendo o diâmetro médio das partículas de 17,46 μm .

Figura 18 – Cimento CPV-ARI RS



Fonte: Autora.

Figura 19 – Distribuição granulométrica do cimento



Fonte: Autora.

A determinação da massa específica foi executada utilizando um frasco volumétrico Le Chatelier com base na norma ABNT 16605:2017. Neste procedimento o frasco é preenchido com água destilada até o nível entre 0 e 1cm³ e colocado em banho térmico em temperatura $20 \pm 1^\circ\text{C}$ durante pelo menos 30 minutos para equalização da temperatura dos líquidos. Após, é registrada a primeira leitura (V1) e introduzido uma massa de cimento conhecida, com auxílio de um funil de haste curta, provocando o deslocamento do líquido até as marcações compreendidas entre 18 e 24 cm³. O frasco é então posto novamente em banho térmico durante 30 minutos e é registrada a leitura final (V2). Como resultado se obteve uma massa específica média $\rho_{\text{méd}} = 2,92 \text{ g/cm}^3$, valor próximo ao relatado pelo fabricante de $3,01 \text{ g/cm}^3$ (ABNT NM 23:2000). Na Figura 20 mostra-se a realização do ensaio.

Figura 20 – Ensaio de determinação da massa específica do cimento: banho térmico (à esquerda) e registro da leitura final (à direita)



Fonte: Autora.

3.2.2. Cinza de Casca de Arroz (CCA)

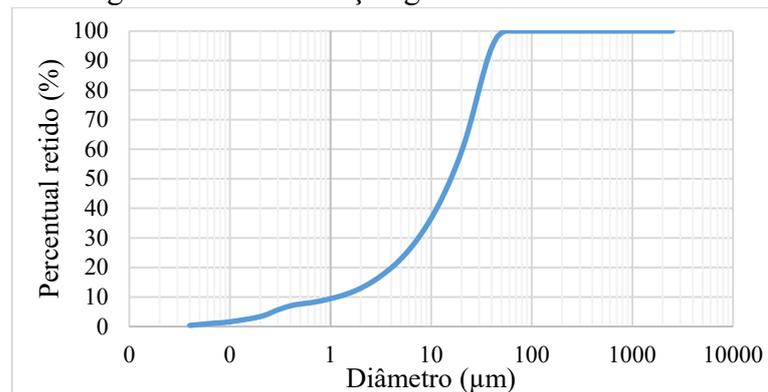
A cinza de casca de arroz foi utilizada para substituição parcial do cimento. Para este estudo, a incorporação desse material apresenta, além de vantagens econômicas e ambientais, a possibilidade de reduzir a retração do composto cimentício, aumentar a resistência do concreto e acrescentar finos na mistura. A Figura 21 e 22 apresentam o material e sua distribuição granulométrica, a qual foi realizada no realizada no LACER/UFRGS e exibiu um diâmetro médio dos grãos de $15,06\mu\text{m}$.

Figura 21 – Cinza de Casca de Arroz



Fonte: Autora.

Figura 22 – Distribuição granulométrica da CCA



Fonte: Autora.

Neste estudo, optou-se pelo uso da cinza de casca de arroz da Silcca Nobre, a qual é refinada e comercializada em sacos de 20 Kg pela empresa Pilecco Nobre de Alegrete-RS. Este material passa por um processo prévio que permite a extração da sílica da casca de arroz no estado amorfo através de um sistema automatizado com controle de temperatura em caldeira na Geradora de Energia Elétrica de Alegrete (GEEA).

De acordo com o fabricante, dentre os principais benefícios da incorporação desta sílica ao concreto, ou argamassa, estão a diminuição da porosidade, o aumento da resistência mecânica e à corrosão, a redução do consumo de cimento e o acréscimo de vida útil da estrutura. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades físicas do material.

Tabela 1 – Propriedades físicas da cinza de casca de arroz

Perda ao fogo (%)	< 3,5%
Umidade (%)	< 3%
Teor de sílica amorfa (%)	> 95 %
Densidade aparente	> 550 kg/m ³
Massa específica	2,26 g/cm ³
Coloração	Cinza claro

Fonte: Adaptado do catálogo Silcca Nobre.

3.2.3. Areia

Os traços analisados consideram a incorporação de areia fina não reativa com álcalis em sua constituição e a exclusão dos agregados graúdos (V. LI, 2019). A areia utilizada neste estudo é proveniente da jazida de Osório/RS e apresenta o diâmetro das partículas inferior à 300 μm . Esse material, mostrado na Figura 23, foi comprado ensacado e úmido, sendo seco à sombra para produção dos traços avaliados.

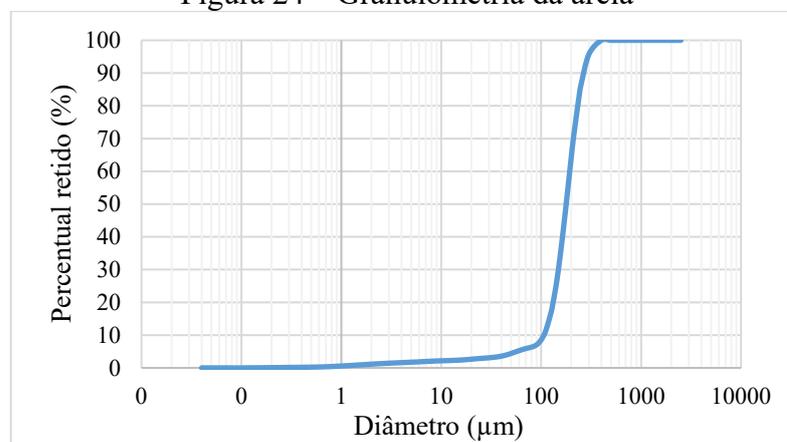
Figura 23 – Areia Fina



Fonte: Autora

A distribuição granulométrica da areia, realizada através do ensaio de granulometria a laser no LACER/UFRGS, é apresentada na Figura 24, sendo o diâmetro médio das partículas de areia de 181,20 μm . A massa específica (γ) do agregado miúdo foi determinada com base na norma DNER-ME 194:1998 considerando o uso do frasco Chapman (Figura 25). Nesse ensaio o recipiente é preenchido com água destilada até a marca de 200 cm^3 , deixando a mistura em repouso. Em seguida é introduzido no frasco 500g de areia, o conjunto é agitado para eliminar bolhas e ar e então é realizada a leitura da marcação no frasco (L). Neste estudo se obteve como resultado médio uma massa específica $\rho_{\text{méd}} = 2,65 \text{ g/m}^3$.

Figura 24 – Granulometria da areia



Fonte: Autora

Figura 25 – Ensaio para determinação da massa específica da areia



Fonte: Autora

3.2.4. Fibra de Polipropileno (PP)

A Fibra adotada para a composição dos traços foi a microfibras de polipropileno (PP) de alta tenacidade, produzida e distribuída pela empresa Brasilit-Saint Gobain de Esteio/RS. De acordo com o fabricante, este material é resultante do processo de fiação por fusão de uma resina de polipropileno, seguido de uma extração controlada para alcançar as propriedades físicas e mecânicas descritas na Tabela 2. Estes filamentos são cobertos por uma fina camada de acabamento por centrifugação, o que garante uma dispersão adequada em água ou no cimento.

Tabela 2 – Especificações da fibra de polipropileno (PP)

Comprimento dos filamentos (mm)	9
Diâmetro médio dos filamentos (dtex)	1,2 (~12,5 μ m)
Densidade (g/cm³)	~0,905
Tenacidade (Cn/dtex)	9 – 11
Tenacidade/Resistência à tração (MPa)	814,5 – 995,5
Alongamento na ruptura (%)	18 – 22
Umidade (%)	1,5

Fonte: Fabricante Saint Gobain

Conforme pode ser visualizado na Figura 26, a fibra fornecida é distribuída de forma compactada, o que dificulta a disposição homogênea desse componente na matriz cimentícia do composto cimentício. Desta forma, durante a moldagem dos corpos de prova foi realizada a desagregação manual do material.

Figura 26 – Fibra de Polipropileno (PP)



Fonte: Autora

3.2.5. Aditivos

A ausência de agregado graúdo e a inclusão de fibras no ECC gera um impacto significativo na consistência da massa no estado fresco, sendo necessária a inclusão de um superplastificante para melhoria da trabalhabilidade e distribuição das fibras na mistura. Além deste aditivo, foi avaliada a incorporação de um agente de pega ao composto cimentício para promover a aceleração no processo de ganho de resistência na mistura. A Tabela 3 apresenta os aditivos utilizados neste estudo, sendo a dosagem indicada pelo fabricante um percentual sobre peso de cimento ou aglomerante (% s.p.c).

Tabela 3 – Aditivos utilizados

Aditivo	Sigla	Função	Fabricante	Massa Específica ρ (g/cm ³)	% indicada (s.p.c)
Liquiplast-6300	LP	Superplastificante	Tecnomor	~1,07	0,5 – 2,2 %
Tec Flow 8000	TF	Superplastificante	GCP applied technologies	1,050 – 1,090	0,2 – 1%
Daraset 100	DS	Acelerador de pega	GCP applied technologies	1,360 – 1400	0,5 – 5%
Daracem	DC	Acelerador de pega	GCP applied technologies	1,18 – 1,22	0,6 – 2%
Suplast 830	SP	Superplastificante	Rodoquímica	~1,100	0,3 – 1%
Cura Mais	CM	Acelerador de pega	Rodoquímica	1,100 – 1,150	1 – 5%
ADVA Cast 719	ADVA	Superplastificante e acelerador de pega	GCP applied technologies	1,060 – 1,100	0,4 – 1,2 %

3.2.6. Resina Epóxi

A resina epóxi utilizada para promover aderência entre o composto cimentício e o tabuleiro metálico foi a Sikadur Epóxi, doada pela empresa Sika (Figura 27). Esse material é classificado pelo fabricante como um adesivo estrutural de média viscosidade, elevada resistência mecânica à tração e compressão e de endurecimento rápido, o qual pode ser utilizado para colagem tanto de superfícies de concreto, quanto aço. Para o emprego eficiente deste material, recomenda-se a sua utilização em superfícies secas e livres de impurezas, com uma temperatura de aplicação entre 10°C e 35°C. Por ser um adesivo bicomponente, também é necessária a mistura efetiva e correta das proporções, sendo a razão A:B = 2:1 em peso. A Tabela 4 apresenta os principais dados técnicos e de caracterização do material fornecidos pelo fabricante.

Figura 27 – Sikadur Epóxi



Fonte: Autora.

Tabela 4 – Dados Técnicos Sikadur Epóxi

Composição	Densidade	Temperatura de serviço	Manuseio	Cura	
				Inicial	Final
Resina Epóxi	1,7 kg/L	-20°C < T < 60°C	45 min	24hrs	7dias
Resistência à flexão (ASTM 580)	Resistência à compressão (ASTM D-695)		Resistência à Aderência		
	24hrs	7dias	Concreto (ASTM C 882)	Aço (Pull Off Test)	
>35 MPa (7dias)	50 MPa	70MPa	>10 MPa (7dias)	~8 MPa (3dias)	

Fonte: Manual Técnico Sika

3.2.7. Água

A água para composição dos traços foi proveniente da rede de abastecimento local da cidade de Porto Alegre.

3.3. ETAPAS EXPERIMENTAIS

Neste item serão detalhas as etapas experimentais apresentadas na Figura 17.

3.3.1. Etapa preliminar

Nesta etapa foram definidos os materiais, detalhados no item 3.2, os quais foram adquiridos através de compra e doação. A fim de determinar as propriedades individuais de cada componente, foi realizada a caracterização da areia fina e do cimento através dos ensaios de granulometria e densidade. Com relação à cinza de casca de arroz (CCA), as fibras de polipropileno (PP), o epóxi e aos aditivos, as informações foram fornecidas pelos fabricantes e não foram mensuradas por experimentos adicionais.

3.3.2. Etapa Exploratória 1

A primeira etapa exploratória ocorreu de maneira integrada com a primeira fase. Nessa etapa realizou-se a experimentação do material em laboratório, avaliando-se inicialmente a trabalhabilidade e consistência do traço de ECC desenvolvido em pesquisas anteriores no LEME (COSTA, 2015; RIGHI, 2015; RODRÍGUEZ, 2018) denominado de ECC_{LEME}.

Neste momento foi avaliada a incorporação à mistura ECC_{LEME} da combinação de dois aditivos com funcionalidades diferentes, um superplastificante e outro acelerador de cura. O primeiro é convencionalmente incluído em compostos cimentícios com adição de fibras para melhoria da trabalhabilidade no estado fresco. O segundo foi acrescentado considerando a aplicação do material em obras viárias de infraestrutura metálica, as quais exigem uma liberação rápida para a circulação de veículos e pessoas, ou seja, necessitando de um ganho de maior resistência nas primeiras idades.

A determinação da consistência por meio do ensaio da trabalhabilidade, o qual será detalho do item 3.4.3, foi a proposta escolhida nesta fase para a avaliação das propriedades frescas do composto cimentício (Figura 28). A definição dos percentuais combinados de cada arranjo de aditivos superplastificante e acelerador de pega levou em consideração os teores mínimos

indicados pelos fabricantes, observando que o acréscimo agrupado dos aditivos poderia provocar alterações na relação água/cimento da mistura. Ainda, foram realizadas correções necessárias nos quantitativos do traço original, descrito na Tabela 5, de acordo com a densidade individual de cada componente, denominando este traço como ECC_{REF} . Manteve-se a proporção original de substituição das fibras de cerca de 2% em volume.

Tabela 5 - Traço ECC_{REF} em kg/m^3

Traço	Cimento	Areia	Água	Fibra	Superplastificante	Acelerador de cura
ECC_{REF}	1009,142	757,534	348,563	17,786	% e tipo à definir	% e tipo à definir

Figura 28 – Trabalhabilidade do ECC_{LEME} : etapa exploratória



Fonte: Autora

3.3.3. Etapa 1

O objetivo da primeira etapa foi avaliar qual a combinação de aditivos superplastificante e acelerador de pega que, incorporados ao traço ECC_{REF} , proporcionou o melhor conjunto de resultados de resistência à compressão simples nas primeiras idades, de retração por secagem e trabalhabilidade. Para tanto, foram verificados oito arranjos de aditivos diferentes, os quais foram combinados por recomendação dos fornecedores. A Tabela 6 exibe um esquema quantitativo dos corpos de prova moldados nesta fase.

Na Tabela 6 o nome adotado para cada combinação foi definido considerando a abreviatura do traço referência (Ref) acrescentado das siglas de cada aditivo incorporado ao traço. Quando a combinação foi repetida e apenas modificou o percentual de adição de superplastificante, este

também foi incluído na nomenclatura. As características dos agentes superplastificante e acelerador de cura foram determinadas no item 3.2.5.

Tabela 6 – Quantitativos relacionados à Etapa 1

Nome adotado para a combinação	Aditivos considerados (8 combinações)		RCS (3 níveis)	Retração Livre (5 níveis)
	Aditivo Superplastificante	Aditivo acelerador de pega	24 horas, 3, 7 dias	24 horas, 4,7,14, 28 dias
Ref_LP	Liquiplast-6300 (LP)	-	12	4
Ref_0,34%TF	TecFlow 8000 (TF)	-	12	4
Ref_0,2%TF	TecFlow 8000 (TF)	-	12	4
Ref_TF+DC	TecFlow 8000 (TF)	Daracem (DC)	12	4
Ref_SP+CM	Suplast 830 (SP)	Cura Mais (CM)	12	4
Ref_ADVA	ADVA Cast 719		12	4
Ref_0,34%TF+DS	TecFlow 8000 (TF)	Daraset 100 (DS)	12	4
Ref_0,2%TF+DS	TecFlow 8000 (TF)	Daraset 100 (DS)	12	4
Total de CPs			96	32

Figura 29 – Execução da moldagem de um dos traços avaliados na Etapa 1.



Fonte: Autora

Com base nos resultados desta etapa, os quais serão apresentados e discutidos no item 4.1, definiu-se que os aditivos utilizados nas fases posteriores seriam os referentes ao arranjo denominado Ref_0,2%TF+DS, traço denominado como ECC_{REF}. Logo, optou-se pela utilização do superplastificante Tecflow 8000 combinado ao acelerador de pega Daraset 100, sendo os respectivos percentuais de adição 0,204% e 0,5%, respectivamente, calculado sobre o peso de cimento ou aglomerante.

3.3.4. Etapa Exploratória 2

Da mesma forma que na etapa exploratória 1, nesta fase foi realizada a experimentação do material com uma dosagem alternativa, a qual considerou a substituição parcial do cimento Portland por cinza de casca de arroz (ECC_{CCA}). Com base na combinação de aditivos escolhida para o ECC_{REF} , realizada na etapa anterior, foi avaliado o percentual de substituição do cimento por CCA e o teor de aditivo superplastificante para a nova mistura. O percentual de incorporação de aditivo acelerador de pega foi mantido constante em 0,5% para todos os arranjos, sendo esse o mínimo indicado pelo fabricante. Salienta-se que os teores de incorporação dos aditivos são calculados sobre o peso de aglomerantes (% s.p.a), ou seja, sobre a soma da quantidade de cimento e CCA.

Os traços de ECC_{CCA} foram analisados através dos ensaios de trabalhabilidade e de resistência à compressão simples com a idade de 3 dias. Como a definição do teor de utilização de cinza não foi um dos objetivos específicos deste estudo, optou-se pela análise da resistência à compressão dos traços em apenas um nível e a não realização do ensaio de retração por secagem. A Tabela 7 exibe o quantitativo dos corpos de prova moldados nesta fase e suas considerações. O nome adotado para cada combinação inicia com a referência ECC somada ao percentual de CCA analisado e, em seguida, pelo teor de incorporação do superplastificante Tecflow 8000 (TF).

Tabela 7 – Quantitativos relacionados à Etapa exploratória 2

Nome adotado para cada a combinação	% de substituição em peso do cimento por CCA	Aditivos		RCS (1 nível)
		% s.p.a Superplastificante (TecFlow 8000)	% s.p.a Acelerador de pega (Daraset 100)	3 dias
ECC_30%CCA_0,4%TF	30%	0,40%	0,50%	4
ECC_30%CCA_0,5%TF	30%	0,50%	0,50%	4
ECC_25%CCA_0,4%TF	25%	0,40%	0,50%	4
ECC_20%CCA_0,31%TF	20%	0,31%	0,50%	4
ECC_20%CCA_0,36%TF	20%	0,36%	0,50%	4
ECC_15%CCA_0,3%TF	15%	0,30%	0,50%	4
Total de CPs				24

A Tabela 8 apresenta os traços em kg/m^3 de cada arranjo moldado nesta etapa. Observa-se que para cada combinação mantiveram-se as proporções do traço ECC_{REF} , sendo a relação água/aglomerante de 0,345, areia/aglomerante de 0,75 e adição de 2% em volume de fibras.

Tabela 8 – Traços da Etapa Exploratória 2 em kg/m³

Combinação	Cimento	CCA	Areia	Água	Fibra	TecFlow	Daraset
ECC_30%CCA_0,4%S	680,836	291,803	730,145	335,904	17,825	3,935	4,861
ECC_30%CCA_0,5%S	680,836	291,803	730,145	335,904	17,825	4,861	4,861
ECC_25%CCA_0,4%S	733,846	244,578	734,543	338,103	17,825	3,935	4,861
ECC_20%CCA_0,31%S	787,557	196,773	738,942	340,071	17,825	3,125	4,861
ECC_20%CCA_0,36%S	787,557	196,773	738,942	340,071	17,825	3,588	4,861
ECC_15%CCA_0,3%S	841,843	148,506	743,456	342,038	17,825	3,125	4,861
ECC _{REF}	1009,142	-	757,534	348,563	17,786	2,059	5,046

Como resultados desta etapa, os quais serão apresentados e discutidos no item 4.2, definiu-se para as próximas fases que o traço de trabalho ECC_{CCA} seria o referente a combinação ECC_20%CCA_0,36%TF. Essa considerou um teor de incorporação de substituição do cimento por CCA de 20% e os percentuais de Tecflow 8000 de 0,36% e Daraset 100 de 0,5%, calculados sobre a massa total de aglomerante.

3.3.5. Etapa 2

Definidos os aditivos e seus respectivos teores adotados neste estudo, assim como o percentual de substituição do cimento Portland por CCA no traço alternativo, a segunda etapa avaliou as propriedades mecânicas e de trabalhabilidade dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA}, os quais são descritos na Tabela 9. Para que os traços fossem comparáveis, mantiveram-se as proporções de água/aglomerante de 0,345, areia/aglomerante de 0,75 e adição de 2% de fibras de PP, considerando esse percentual em termos de volume total.

Tabela 9 – Traços relativos à Etapa 2 em kg/m³

Combinação	Cimento	CCA	Areia	Água	Fibra	TecFlow 8000	Daraset 100
ECC _{REF}	1009,142	-	757,534	348,563	17,786	2,059	5,046
ECC _{CCA}	787,557	196,773	738,942	340,071	17,825	3,588	4,861

Nesta fase foram realizados os ensaios de trabalhabilidade, retração livre e por secagem e resistência à compressão simples e à tração na flexão. Embora a caracterização à tração direta seja importante para verificação do comportamento *strain hardening* do ECC, não foi possível a realização deste ensaio durante esta pesquisa. A Tabela 10 apresenta o quantitativo de corpos de prova que foram moldados nesta etapa, considerando 3 repetições para cada nível dos ensaios de resistência à tração na flexão, 6 para o ensaio de RCS e 12 para a mensuração da retração, sendo 8 corpos de prova (CPs) de 2,5x2,5x28,5cm e 4 corpos de prova (CPs) de

7,5x7,5x28,5cm. Destaca-se que a moldagem foi realizada em betoneira convencional (Figura 30) com mistura por tombamento, conforme viabilizado na pesquisa de Rodriguez (2018).

Tabela 10 – Quantitativos relacionados à Etapa 2

Ensaio	RCS (4 níveis)	RTF (4 níveis)	Retração Livre (5 níveis)	
			(2,5x2,5x28,5cm ³)	(7,5x7,5x28,5cm ³)
Idades	24hrs, 3, 7, 28 dias	24hrs, 3, 7, 28 dias	24hrs, 4, 7, 14, 28 dias	
ECC _{REF}	24	3	8	4
ECC _{CCA}	24	3	8	4
Total de CPs	48	9	16	8

Figura 30 – Moldagem da Etapa 2



Fonte: Autora

A resistência à compressão simples e resistência à flexão dos corpos de prova foi mensurada em quatro níveis: 24 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias. A retração foi avaliada através de duas abordagens. A primeira considerou a avaliação da retração por secagem, onde foi realizada a cura em imersão em água com cal durante 28 dias de 4 corpos de prova de dimensões 2,5x2,5x28,5cm, conforme descreve a norma ASTM C157/C157M: 2017. A segunda seguiu a mesma normativa, porém não considerou o período de cura em imersão para as demais amostras moldadas: 4 CPs 2,5x2,5x28,5cm e 4 CPs de 7,5x7,5x28,5cm, sendo descrito como um processo de retração livre, conforme o procedimento relatado por Costa *et al.* (2019). Optou-se pelo uso de tamanhos diferentes de corpos de prova para realizar uma comparação com os dados

obtidos por Costa *et al.* (2019) e para verificar a influência da variação de dimensões nos resultados de retração.

3.3.6. Etapa 3

A verificação da aderência entre o ECC e o tabuleiro metálico foi realizada através do ensaio de cisalhamento oblíquo, detalhado no item 3.4.8. Para esse procedimento foram moldados corpos de prova compostos por uma camada de 3,5cm de ECC sobre uma placa metálica de igual espessura, sendo a dimensão total das amostras de 12,5x13,75x7 cm, conforme mostra a Figura 31. Entre os dois materiais foi considerada uma camada para promover aderência. As moldagens foram realizadas em pares devido à disponibilidade de apenas duas placas de aço. Dessa forma, antes de cada reutilização, as placas foram lixadas, limpas com álcool isopropílico e reutilizadas. Neste ensaio, o tempo de cura considerado para os corpos de prova foi de 7 dias.

Figura 31 – Corpo de prova composto para o ensaio de cisalhamento oblíquo



Fonte: Autora.

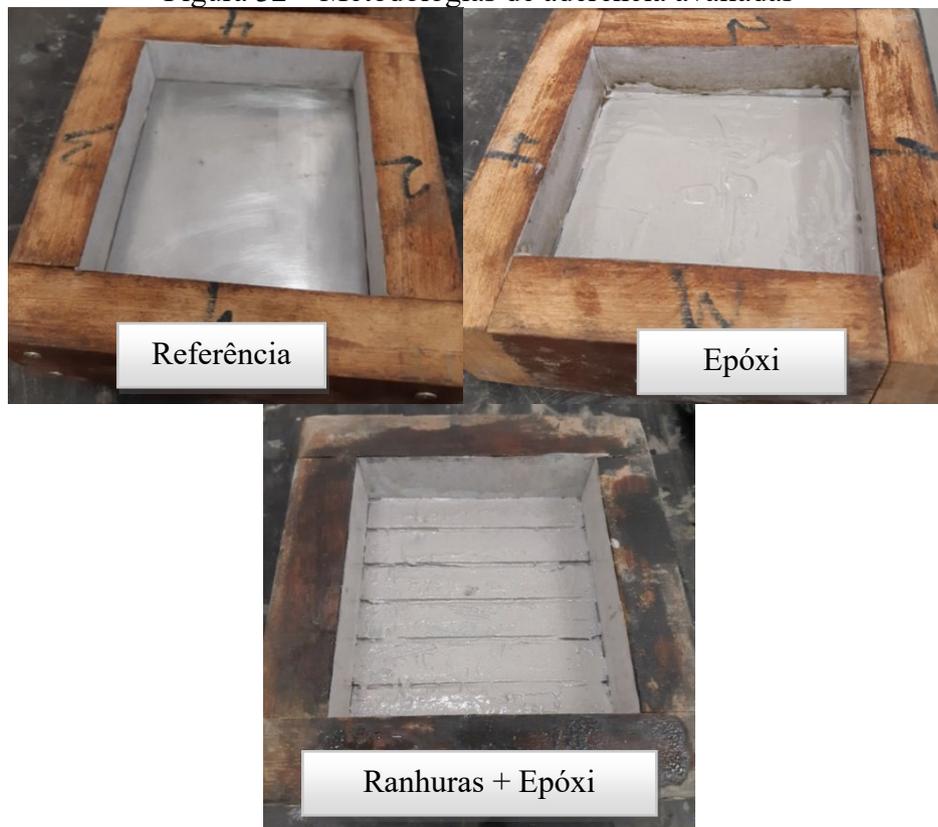
Nesta fase foram avaliados o comportamento dos traços detalhados na etapa 2, ECC_{REF} e ECC_{CCA}, considerando a adoção de duas metodologias diferentes para promover aderência entre o composto cimentício e a placa metálica, também denominadas como estratégias de aderência. Ainda, foi verificada uma condição referência, na qual não se adicionou qualquer elemento com características adesivas entre os materiais. Uma das estratégias analisadas considerou a aplicação de uma camada de resina epóxi diretamente sobre a superfície da placa metálica lisa, enquanto a outra considerou a aplicação do epóxi sobre a superfície com ranhuras. Todas as configurações de aderência adotadas podem ser visualizadas na Figura 32. A dosagem de epóxi foi de 0,6 l/m³ para todas as análises, baseado nos resultados descritos no artigo de MA *et al.* (2018) para um temperatura de 23°C. A Tabela 11 descreve as 6 combinações avaliadas através

do ensaio de cisalhamento oblíquo, as quais consideraram quatro repetições, exceto para a condição referência.

Tabela 11 – Quantitativos relacionados à Etapa 3

Estratégias de Aderência	Referência	Resina Epoxy	Resina Epoxy + Ranhuras
ECC _{REF}	2	4	4
ECC _{CCA}	2	4	4
Total de CPs	4	8	8

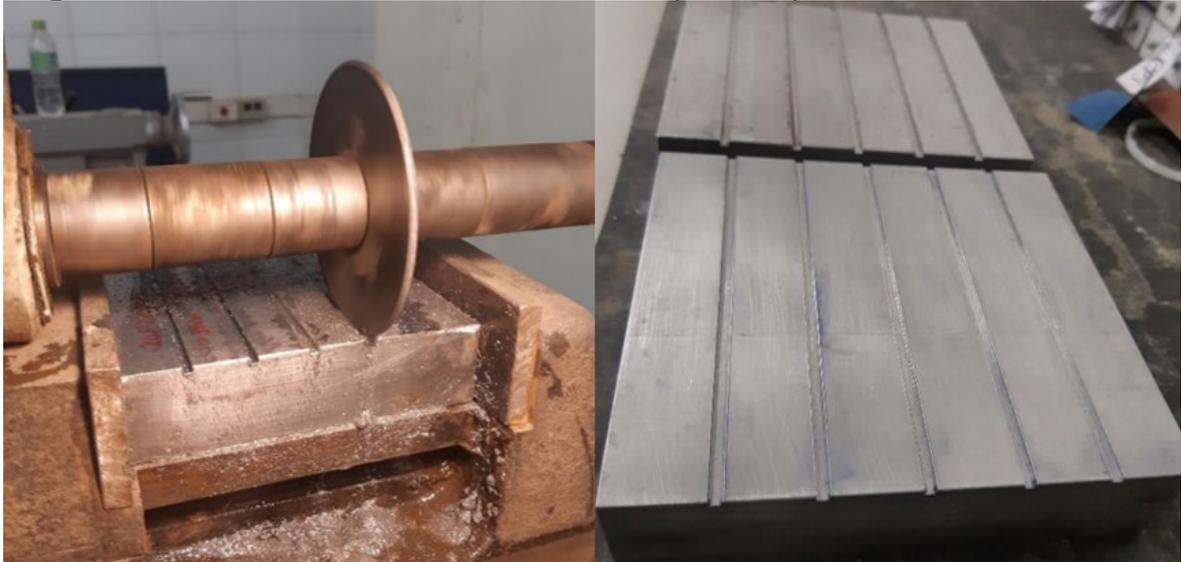
Figura 32 – Metodologias de aderência avaliadas



Fonte: Autora

O processo de abertura das ranhuras na superfície metálica de cada uma das placas, mostrado na Figura 33, foi realizado manualmente pelo técnico capacitado do LEME com o equipamento específico disponível no laboratório. O padrão escolhido para as ranhuras de cada placa foi de 3mm de largura e 1,5mm de profundidade, sendo 5 sulcos distribuídas igualmente na direção perpendicular à aplicação da carga de cisalhamento.

Figura 33 – Processo de abertura de ranhuras, à esquerda, e placa com ranhuras, à direita



Fonte: Autora

3.3.7. Etapa 4

Paralelamente à fase anterior, foram construídos três modelos experimentais em pequena escala constituídos de composto cimentício, tabuleiro metálico (0,635x100x100cm) e uma camada de resina epóxi, considerando a dosagem de 0,6 l/m², para promover adesão entre os materiais. Foram moldados um protótipo para o traço ECC_{REF} e dois para o ECC_{CCA}. Cada modelo foi avaliado durante 28 dias e instrumentado para verificação das deformações longitudinais ao longo do tempo, provocadas especialmente pela retração restringida na base. Também foram observados o processo de cura dos traços e a abertura de fissuras. Os modelos serão explicados de forma detalhada no item 3.5.

3.4. MÉTODOS E ENSAIOS

Nos itens seguintes são expostos os métodos considerados neste estudo, incluindo o processo de mistura, os ensaios de caracterização mecânica, de mensuração da retração e da aderência entre camadas e, por fim, o detalhamento do projeto dos modelos experimentais.

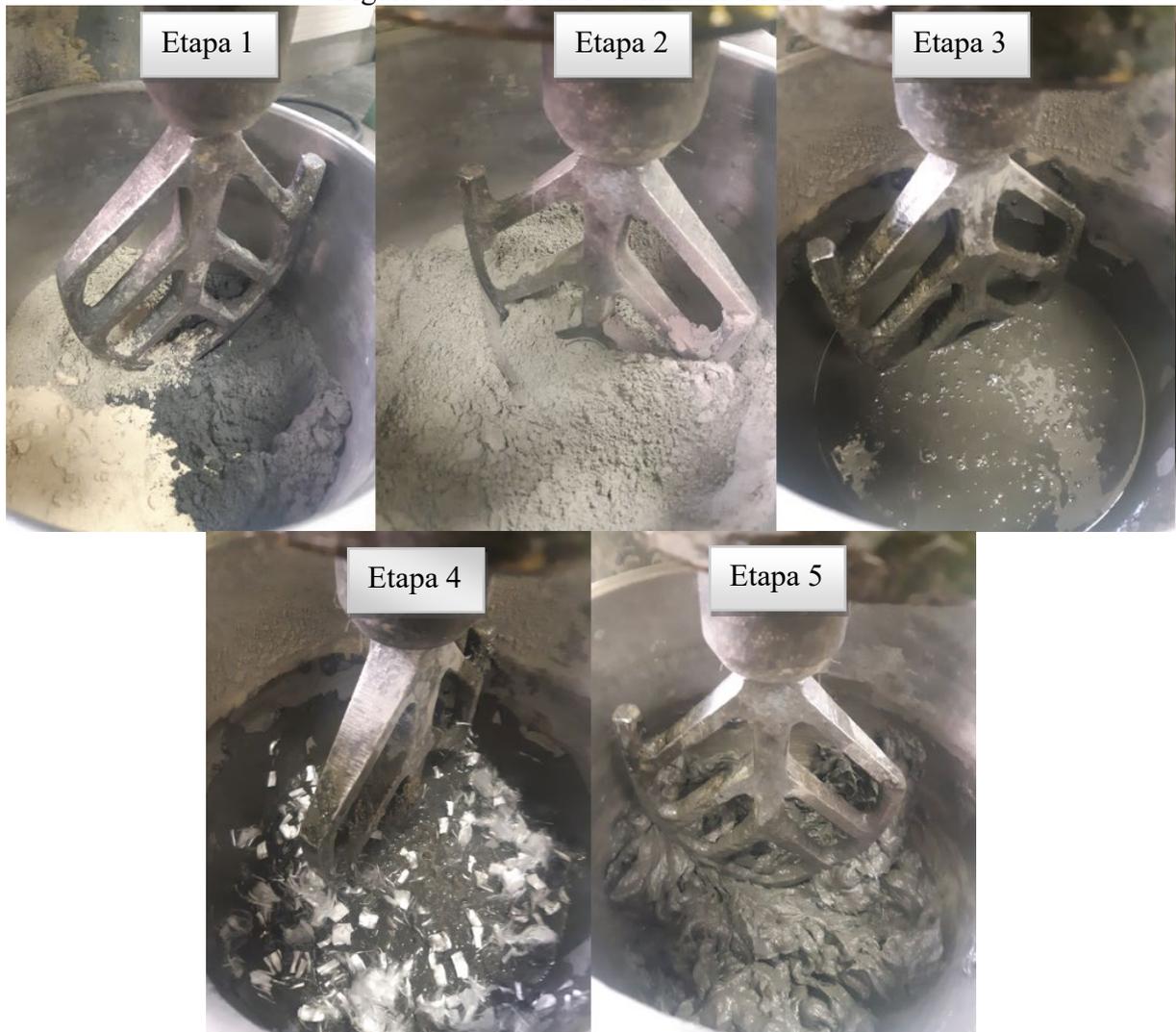
3.4.1. Traços de ECC

Os diferentes traços de ECC analisados neste estudo já foram apresentados na descrição das etapas experimentais nos itens 3.3.2, 3.3.4 e 3.3.5.

3.4.2. Processo de mistura e moldagem

O procedimento de mistura para moldagem dos corpos de prova foi realizado conforme detalhado nos estudos desenvolvidos no LEME (RODRÍGUEZ, 2018; COSTA, 2015; RIGHI, 2015; CASAGRANDE, 2012; GARCEZ, 2009), metodologia semelhante ao descrito por V. Li (2019). Inicialmente misturaram-se os componentes secos durante 5 minutos (Etapa 1 e 2), prosseguindo-se então com a incorporação de água e do aditivo superplastificante. Quando a mistura demonstrou certa plasticidade foi incorporado o aditivo acelerador de cura, conforme instrução do fabricante (Etapa 3). Após cerca de 3 minutos foram incorporadas as fibras gradativamente (Etapa 4), as quais foram desagregadas manualmente, mantendo-se a rotação por aproximadamente 5 minutos (Etapa 5). As etapas referentes ao processo de mistura são mostradas na Figura 34.

Figura 34 – Processo de mistura do ECC.



Fonte: Autora.

Diferente das experiências relatadas pelos pesquisadores do LEME, foi incorporado inicialmente à mistura 80% da quantidade prevista de superplastificante, verificando-se visualmente a consistência e a necessidade de acréscimo do restante do aditivo. Também se observou a segregação dos traços no ensaio de trabalhabilidade, a qual provoca perdas na resistência do material. Li (2019) observa que usar uma quantidade excessiva desse aditivo pode provocar atrasos na hidratação da mistura, justificando este cuidado.

3.4.3. Trabalhabilidade

A trabalhabilidade foi analisada em grande parte das etapas experimentais devido à incorporação de aditivos, em especial ao aditivo superplastificante, o qual tem como principal função a melhoria da consistência da mistura no estado fresco. Essa verificação foi realizada com base na NBR 13276:2016, a qual determina o índice de consistência para argamassas.

De acordo com a NBR 13276:2016, o ensaio deve ser realizado em uma mesa giratória específica com auxílio de um molde cônico, uma régua metálica e um soquete. Após a preparação da massa, o cone deve ser preenchido em três camadas, sendo aplicados entre essas 15, 10 e 5 golpes sequencialmente. Então a superfície é rasada e o molde é retirado verticalmente (Etapa 1), prosseguindo-se 30 giros na mesa. Ao final (Etapa 2), são registrados os três diâmetros que caracterizam o espalhamento médio do material. Na Figura 35 é apresentada a mesa de consistência e as etapas para execução do ensaio.

Figura 35 – Mesa de consistência e execução do ensaio de índice de consistência



Fonte: Autora

3.4.4. Retração

A mensuração da retração foi baseada nos procedimentos descritos na ASTM C157/C157M:2017 e na experiência relatada por Costa (2015) e Costa *et al.*, (2019). Neste ensaio são determinadas as variações no comprimento do corpo de prova retangular, não considerando a aplicação de forças externas e o efeito da variação de temperatura e umidade.

Na etapa 1 foram moldados 4 corpos de prova prismáticos com dimensões de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm para cada traço avaliado, conforme indicado na ASTM C157/C157M:2017 para argamassas. Na etapa 2 foram moldados 12 CPs para cada traço, sendo 8 CPs de dimensões 2,5 x 2,5 x 28,5 cm e 4 CPs de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. Nesta fase optou-se pela moldagem adicional dos corpos de prova 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para comparação com o traço de ECC moldado por Costa (2015). Também foram moldadas 8 amostras menores para comparação dos resultados entre os CPs de tamanho distintos e para avaliação da retração com e sem cura durante 28 dias em imersão em água com cal.

A moldagem de todos os corpos de prova foi realizada em uma forma metálica específica que possibilitou a fixação de pinos roscados inoxidáveis (3/4") nas extremidades de cada corpo de prova, os quais permitiram a leitura das variações de comprimento em diferentes idades. Finalizada a concretagem, as amostras foram protegidas por papel filme e mantidas em uma sala com umidade ($50\% \pm 4\%$) e temperatura controlada ($25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$).

Após 24 horas, os CPs foram desmoldados e imersos em uma solução de água e cal durante meia hora para estabilização das medidas, procedendo-se a leitura dos comprimentos das amostras com auxílio de um relógio comparador digital. Em seguida, retornam para a solução preparada e permanecem submersos por 28 dias, simulando assim a cura do material. Após esse período, os CPs foram retirados da solução e foi realizada uma leitura referência ($\text{CRD}_{\text{inicial}}$) e demais leituras após 4, 7, 14, 21 e 28 dias, denominadas como CRD, mantendo-se as amostras em ambiente controlado. Para verificação da retração livre, o procedimento de cura em imersão durante 28 dias não foi seguido para 4 CPs de dimensões 2,5 x 2,5 x 28,5 cm e 4 CPs de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm de cada traço, os quais foram moldados na Etapa 2. O processo para a realização do ensaio e os diferentes corpos de prova moldados e podem ser visualizados através das Figura 36 e 37.

A retração de cada idade foi determinada com o valor de cada leitura (CRD) menos a leitura de referência ($\text{CRD}_{\text{inicial}}$) sobre o comprimento efetivo de retração por secagem (250mm). A

variação percentual do comprimento (ΔL_x), em qualquer idade desejada, deverá ser calculada através da Equação 1.

$$\Delta L_x = \frac{CRD - CRD_{inicial}}{250} \times 100\% \quad \text{Equação 1}$$

Figura 36 – Ensaio de retração em CP 7,5 x 7,5 x 28,5 cm: (a) CPs logo após a moldagem; (b) CPs protegidas com filme; (c) CPs em imersão; (d) CP retirado da imersão; (e) leitura da retração do CP; (f) armazenagem dos CPs em ambiente controlado;



Fonte: Autora

Figura 37 – Corpos de prova 2,5 x 2,5 x 28,5 cm (à esquerda) e 7,5 x 7,5 x 28,5 cm (à direita)



Fonte: Autora.

3.4.5. Resistência à compressão simples (RCS)

A caracterização mecânica do ECC foi realizada através da mensuração da resistência à compressão simples com base na NBR 5739:2018 (Figura 38). Nas etapas 1 e 2, para cada combinação analisada, foram moldados um mínimo de 4 corpos de prova cilíndricos de 5x10cm, variando as idades em 24 horas e 3 dias para a etapa 1 e 24 horas, 3, 7 e 28 dias para a etapa 2, conforme anteriormente descrito. Além dessas etapas, para cada concretagem foram moldados CPs para conferência da resistência característica do material. A cura das amostras foi realizada em câmara úmida com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, exceto para as amostras rompidas em 24 horas.

Figura 38 – Ensaio de Resistência à Compressão Simples



Fonte: Autora.

A execução do ensaio de resistência à compressão simples foi realizada na prensa Shimadzu no LEME, de capacidade de 2000 kN, a qual promove um carregamento vertical monotônico de baixo para cima nos corpos de prova até o colapso do material (Figura 38). Para todas as amostras utilizou-se uma escala de 1000 kN, com uma precisão de 1 kN, e uma velocidade de carregamento de 0,45 MPa/s. Salienta-se que, para que os CPs fossem rompidos no equipamento, realizou-se a regularização de suas bases através da retificação das superfícies.

3.4.6. Módulo de elasticidade

O Ensaio de módulo de elasticidade, apresentado na Figura 39, foi realizado baseado na norma NBR 8522:2017. Para este procedimento foram moldados 6 CPs cilíndricos de 10cm x 20cm para os traços descritos na Etapa 2, os quais foram concretados juntamente com os modelos experimentais. Todos as amostras foram pintadas de branco com uma nuvem de pontos pretos para a determinação das deformações por imagem através do software GOM Correlate, resultados que não serão abordados nessa dissertação.

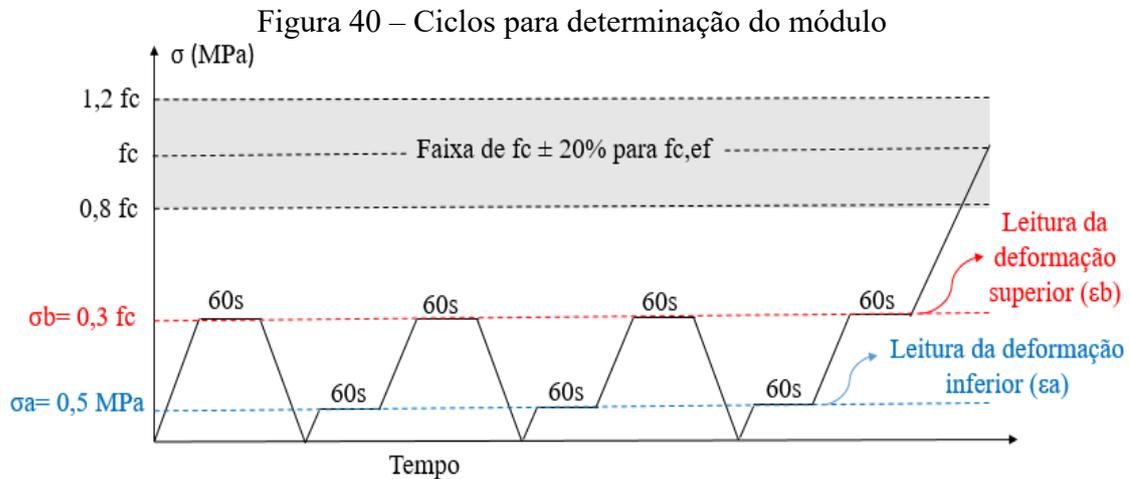
Figura 39 – Ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: Autora.

Para a realização do ensaio, inicialmente foram rompidos à compressão simples 3 CPs de cada traço para a determinação da resistência média (f_c). A NBR 8522:2017 possibilita a realização do ensaio através de duas metodologias. Neste estudo optou-se pela mensuração do módulo de elasticidade através do método que considera a tensão fixa. Com base nesta metodologia, realizou-se um ciclo de 4 carregamentos até a tensão limite superior (σ_b) e 3 descarregamentos

até a tensão limite inferior, mantendo-se as cargas durante 60s nos limites inferior e superior e a velocidade do ensaio em $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. A Figura 40 apresenta um gráfico com os ciclos realizados para a determinação do módulo de elasticidade



De acordo com a Figura 40, adaptada da NBR 8522:2017, a tensão limite superior (σ_b) equivale a 30% do valor da tensão de ruptura média (f_c), enquanto a tensão limite inferior é de 0,5 MPa. Para o traço ECC_{REF} o σ_b encontrado foi de 16 MPa, enquanto para o ECC_{CCA} foi $\sigma_b = 18,8$ MPa. A determinação dos deslocamentos nos ensaios foi realizada acoplado um anel em cada corpo de prova com dois LVDs de curso total de 2mm em suas laterais (Figura 39). Ao final do experimento o anel com os LVDTs foi retirado de cada CP e estes foram rompidos à compressão simples obtendo a resistência efetiva ($f_{c,ef}$). Para os resultados serem definidos como confiáveis, $f_{c,ef}$ estar dentro do intervalo $f_c \pm 20\%$.

O cálculo do módulo de elasticidade ($E_{ci,i}$) em gigapascals (GPa) foi realizado através da Equação 2.

$$E_{ci,i} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

σ_b : é a tensão limite superior que corresponde a 30% da resistência à compressão média (f_c) (MPa);

σ_a : é a tensão limite inferior que corresponde a 0,5 MPa;

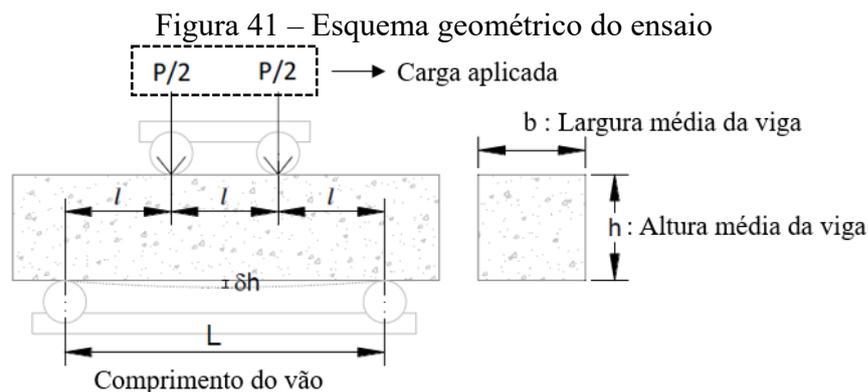
ε_b : deformação específica do concreto na tensão superior;

ε_a : deformação específica do concreto na tensão inferior;

3.4.7. Resistência à tração na flexão (RTF)

A associação do ECC a um “concreto flexível” resulta de seu comportamento dúctil quando submetido à flexão (M. LI, 2014). Quando este material é aplicado como revestimento de tabuleiros metálicos, diferente de um pavimento flexível sobre um subleito de baixa rigidez que é submetido à solicitações de flexão, o ECC irá trabalhar basicamente à compressão. Isso ocorre pois o aço apresenta uma rigidez muito maior que o ECC.

O ensaio de flexão a quatro pontos foi baseado na ASTM C1609/C1609M:2019, a qual apresenta os procedimentos de execução e cálculo para concretos reforçados com fibras. Neste experimento é aplicada uma carga vertical monotônica crescente no terço médio de uma viga biapoiada, solicitando a amostra à flexão, conforme ilustra o esquema geométrico representado na Figura 41.



Fonte: Adaptado de Rodríguez (2018)

A Figura 42 apresenta um gráfico de representação padrão de carga x deflexão exibido na ASTM C1609/C1609M:2019. Os parâmetros de cálculo da tensão de flexão na primeira fissura (f_1) são obtidos a partir da curva modelo e são calculados com base na Equação 3, a qual é aplicada para o regime linear elástico.

$$f_1 = \frac{P_1 L}{bh^2} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

f_1 : tensão de tração na flexão (MPa);

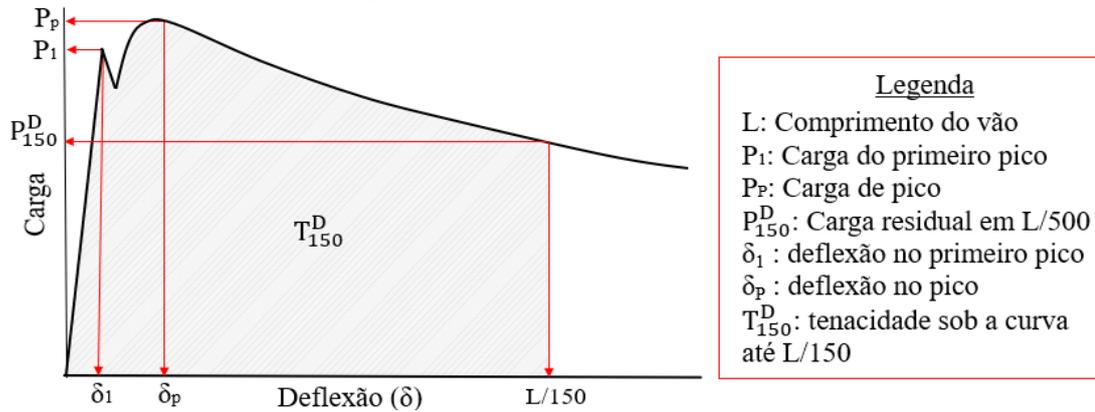
P_1 : carga vertical aplicada (N);

L : comprimento do vão de separação dos suportes (mm);

b : largura média da seção viga (mm);

h : altura média da seção viga (mm);

Figura 42 – Parâmetros de cálculo



Fonte: Adaptado de ASTM C1609/C1609M (2019)

Assumindo o regime linear até a primeira fissura, o módulo de elasticidade flexural (ϵ_{cc}) do compósito cimentício no estado não fissurado foi definido através da Equação 4, a qual considera a proporcionalidade entre a tensão e a deformação (NAAMAN, 2008):

$$E_{cc} = \frac{f_1}{\epsilon_1} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

ϵ_{cc} : Módulo de Elasticidade (GPa);

f_1 : Tensão na flexão na primeira fissura (MPa);

ϵ_1 : Deformação na primeira fissura (mm/m), calculada considerando δ/L ;

Considerando a parcela não linear plástica, a qual ocorre após a tensão na primeira fissura (f_1), a norma ASTM C1609/C1609M recomenda o cálculo da tensão de tração na flexão equivalente ($f_{e,150}^D$) no ponto de carregamento em $L/150$, neste acaso no ponto de deflexão $\delta=2\text{mm}$. Para isso, é utilizada a Equação 5, a qual considera a Tenacidade (T_{150}^D) obtida através da área sob a curva de carga x deflexão em $L/150$. Ainda, como forma de avaliar a ductilidade do ECC, a relação entre a tensão residual e a tensão de primeira fissura ($R_{T,150}^D$) pode ser definida através da Equação 6.

$$f_{e,150}^D = \frac{150 \cdot T_{150}^D}{bh^2} \quad \text{Equação 5}$$

$$R_{T,150}^D = \frac{f_{e,150}^D}{f_1} \times 100\% \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

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

T: tenacidade (J);

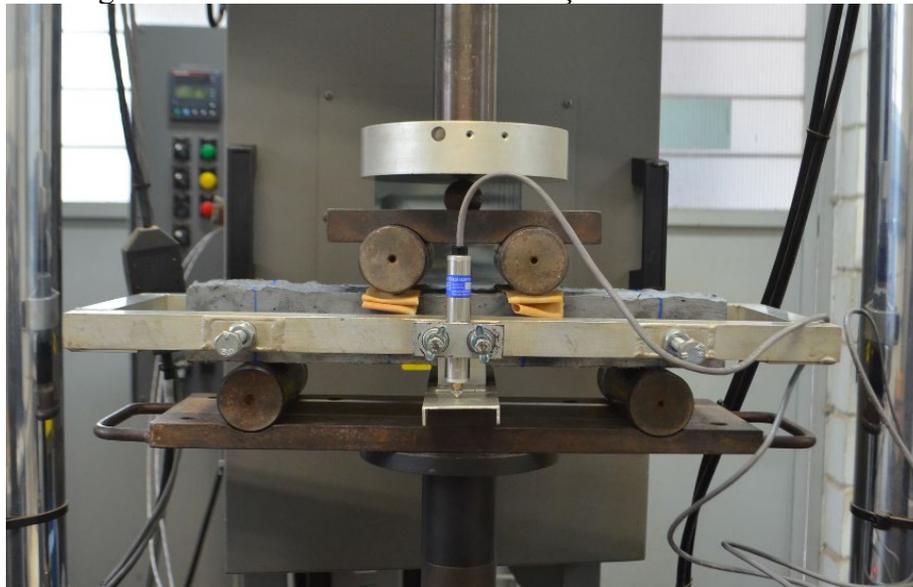
b: largura média da seção viga (mm);

h: altura média da seção viga (mm);

De acordo com a ASTM C1609/C1609M:2019, os corpos de prova necessitam ser prismáticos com comprimento mínimo de 350 mm. Da mesma forma, esses devem exibir a largura e profundidade pelo menos três vezes superiores ao comprimento máximo das fibras. Assim, para cada combinação de traço e respectivo tempo de cura descrito na etapa 2 foram moldadas 3 vigas de 5x10x40 cm, totalizando 12 corpos de prova para cada traço.

A execução dos ensaios foi realizada na prensa MTS no LAPAV/UFRGS com uma velocidade de carregamento de 0,2mm/min, conforme indicado em norma. Para a medida das deformações dos corpos de prova utilizou-se um LVDT de 4mm fixo em um suporte na posição central das vigas. Após a realização de cada ensaio, para avaliação da qualidade dos resultados, verificou-se se a fissura principal se encontrava entre o terço médio da viga, com uma tolerância de 5% do comprimento L. Caso as vigas se apresentassem fora desse padrão, os resultados deveriam ser descartados, o que não ocorreu neste estudo. A Figura 43 apresenta a execução do ensaio.

Figura 43 – Ensaio de resistência à tração na Flexão em ECC

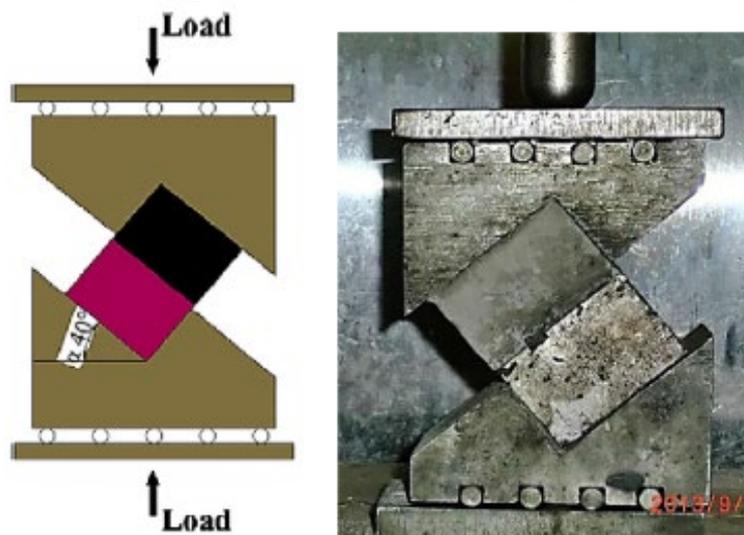


Fonte: Autora

3.4.8. Cisalhamento Oblíquo

Na pavimentação, a aderência entre as camadas é de suma importância para que os elementos trabalhem em conjunto. Assim, neste estudo verificou-se a adesão entre o composto cimentício e o aço para que não ocorresse o escorregamento entre os componentes. A mensuração desta propriedade foi realizada variando as estratégias que proporcionam aderência entre os materiais, conforme descrito na etapa 3, submetendo as amostras ao cisalhamento oblíquo. O ensaio de cisalhamento oblíquo foi baseado no procedimento descrito por MA *et al.* (2018), exibido na Figura 44, sendo necessário a adaptação e construção de um aparato específico para a execução do ensaio na prensa do LEME.

Figura 44 – Cisalhamento Oblíquo

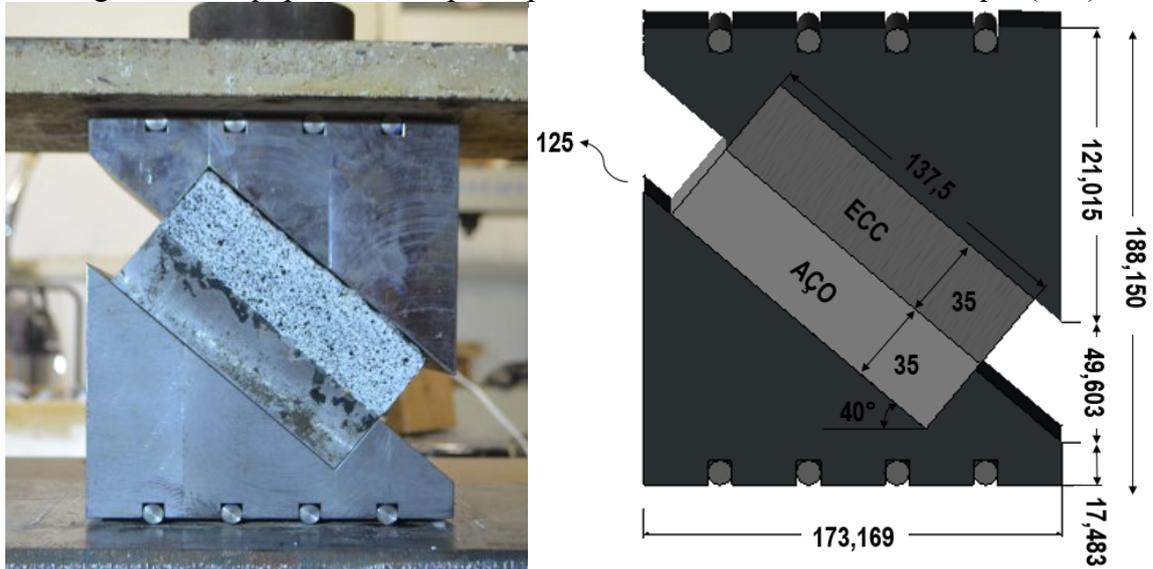


Fonte: MA *et al.* (2018)

As adaptações necessárias para o ensaio de cisalhamento oblíquo consideraram a utilização da prensa Shimadzu, a qual apresenta uma capacidade de carga de cerca de 2000 kN. Para possibilitar maior sensibilidade dos dados avaliados, inicialmente foi realizada a adaptação das dimensões dos corpos de prova descritos por MA *et al.* (2018), aumentando-se as proporções da área de base em cerca de 2,5 vezes e mantendo-se a mesma altura considerada pelos autores. Assim, os corpos de prova compostos de aço e ECC apresentaram dimensões individuais de 12,5x13,75x3,5 cm, sendo a altura total dos componentes aderidos de 7 cm. Considerando os dados experimentais apresentados por MA *et al.* (2018), calculou-se que o acréscimo das dimensões da base proporcionaria um aumento de cerca de 6,25 vezes da força aplicada para um mesmo valor de tensão. Com base nas novas dimensões dos corpos de prova, projetou-se o aparato para execução do ensaio de cisalhamento oblíquo, o qual foi construído em aço 1045.

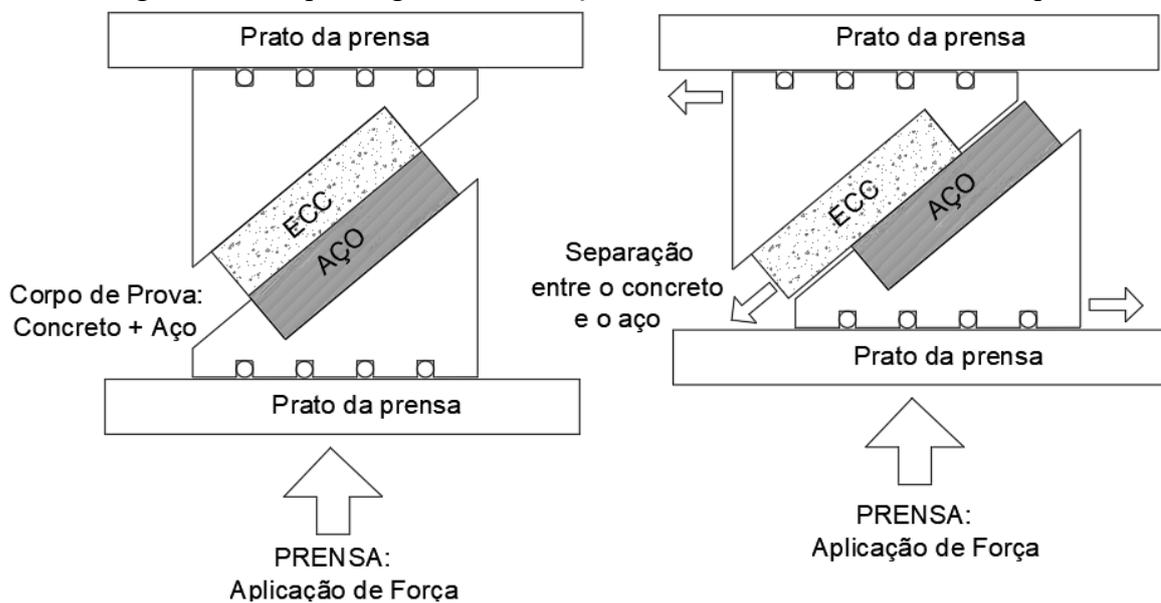
A Figura 45 apresenta o aparato construído para a execução do ensaio, considerando as medidas em milímetros, e a Figura 46 apresenta um esquema que exemplifica a execução do ensaio.

Figura 45 – Equipamento adaptado para o ensaio de cisalhamento oblíquo (mm)



Fonte: Autora

Figura 46 – Esquema geral da execução do ensaio de cisalhamento oblíquo



Fonte: Autora

Conforme demonstra a Figura 46, o corpo de prova composto de aço e ECC foi encaixado no aparato, o qual proporciona a execução do ensaio. Esse foi alocado na prensa e, então, aplicou-se uma força vertical neste conjunto, considerando uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min, até promover a separação total ou parcial entre o ECC e o aço. Os roletes encaixados nas extremidades inferior e superior das peças que compõe o aparato são responsáveis pela movimentação horizontal do conjunto, auxiliando no processo de cisalhamento oblíquo. O

ângulo de cisalhamento adotado foi de 40°, referente ao plano de frenagem dos veículos, indicado por MA *et al.* (2018) como mais agressivo. A resistência ao cisalhamento foi calculada com base na Equação 7.

$$\tau = \frac{Px \sin \alpha}{S} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

τ : Resistência ao cisalhamento (MPa);

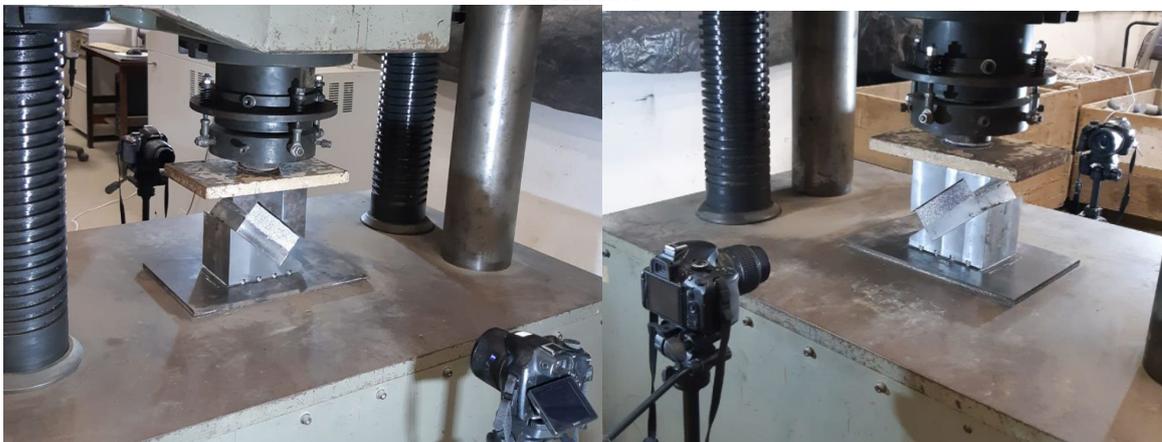
P: Carga (KN);

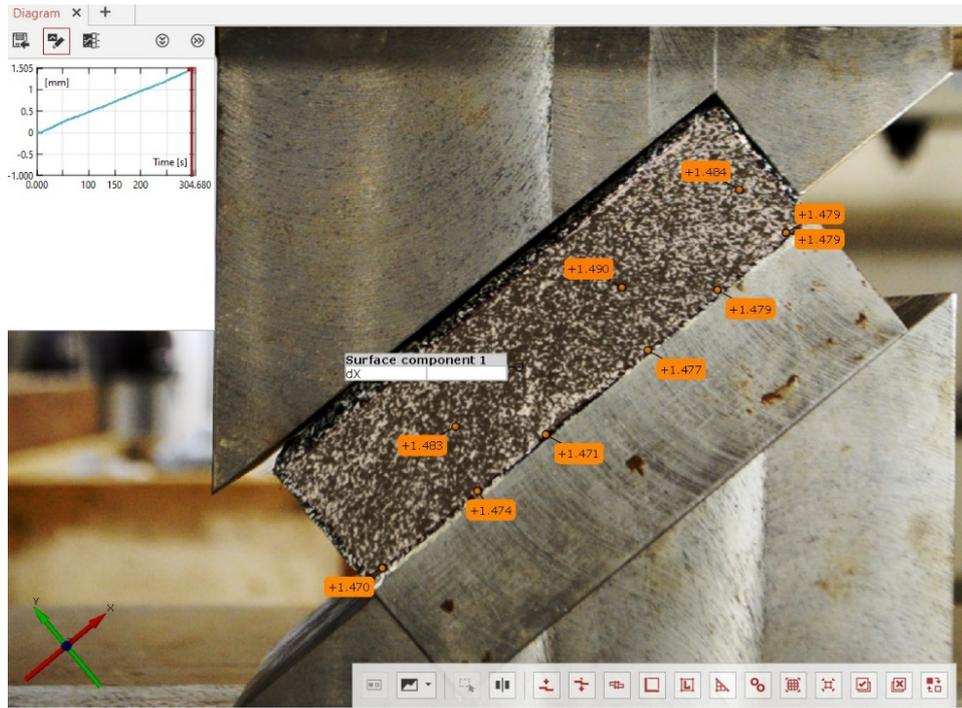
α : Ângulo do cisalhamento (graus);

S: Área da base do corpo de prova (m²);

Neste ensaio também foi realizada a avaliação dos deslocamentos na área de cisalhamento, no plano de 40°, com a auxílio da versão gratuita do software GOM Correlate. Este software possibilita a verificação das deformações e deslocamentos no tempo através da captação das imagens em vídeo, gravadas com uma câmera com boa resolução e iluminação adequada. Para isso, todas as amostras foram pintadas com tinta branca e com a aspersão de pontos pretos na parte correspondente ao ECC moldado, gerando o contraste necessário para a aplicação dessa técnica de análise das deformações e deslocamentos. Observa-se que os dados de deslocamento são dependentes da qualidade de obtenção das imagens, da pintura do corpo de prova e da correta relação entre o tempo da captura da imagem e da força de aplicação do ensaio, podendo ocorrer erros na correlação dos dados. A Figura 47 mostra a captura das imagens e a simulação no programa, a qual foi realizada com a rotação dos eixos para o plano de 40°.

Figura 47 – Execução do ensaio de cisalhamento oblíquo e simulação no software GOM Correlate





Fonte: Autora

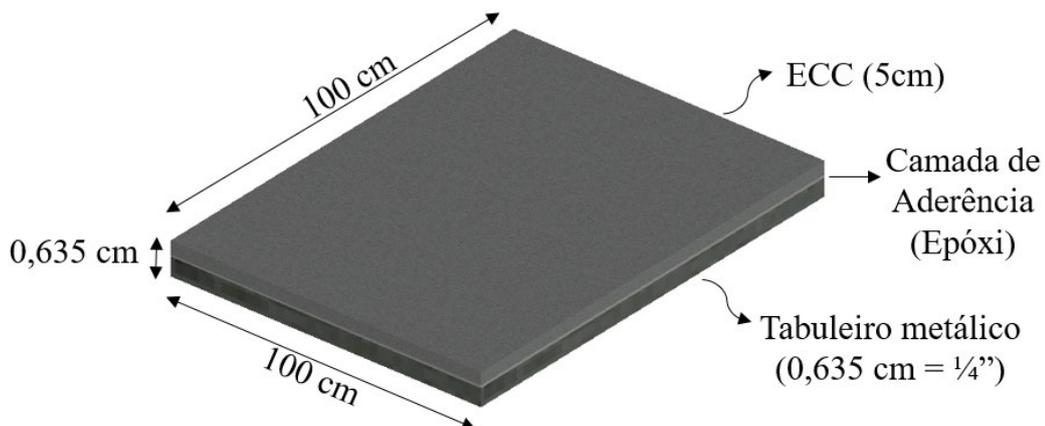
3.5. MODELOS

A construção dos modelos experimentais foi idealizada para a ponte Getúlio Vargas, popularmente conhecida como ponte do Guaíba, localizada entre as rodovias BR-116 e BR-290 na cidade de Porto Alegre-RS. Essa é composta por uma estrutura mista exibindo um deque metálico central móvel (58,5 m x 17,2 m), constituído por chapas lisas unidas por rebites, o qual é elevado para a passagem de embarcações de grande porte pelo lago Guaíba. Para a elaboração dos modelos, contou-se com o auxílio da empresa responsável pela manutenção e operação desta estrutura, a qual forneceu informações importantes para o projeto. Também, foram considerados dados contidos no artigo publicado por Specht *et al.* (2012), estudo que descreve o projeto e a execução da restauração do pavimento desta estrutura utilizando revestimento asfáltico.

A adoção da espessura do composto cimentício levou em consideração a massa máxima permitida no vão móvel da ponte do Guaíba, cerca de 120,7 toneladas, a densidade estimada para o ECC, em média 2400 kg/m³ (RODRIGUEZ, 2018), e a espessura atual de revestimento do tabuleiro metálico de 5 cm de Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ). No caso desta ponte, essas ponderações são muito importantes para manutenção do sistema de içamento por contrapesos do deque e para que não exista um desnível entre os revestimentos das estruturas fixa e móvel.

Nessa pesquisa foram construídos três modelos experimentais compostos por uma camada de cerca de 5 cm de ECC sobre uma placa maciça de aço 1045 de $\frac{1}{4}$ " de espessura (6,35 mm) e 100cm x 100cm de base. Entre estes materiais foi aplicada uma camada de resina epóxi Sikadur com a dosagem de 0,6 l/m², estratégia de aderência que também foi avaliada nos ensaios de cisalhamento oblíquo. Optou-se pela adoção desta metodologia de aderência devido a maior aplicabilidade prática em campo. Antes da aplicação do adesivo estrutural, a superfície metálica foi lixada e limpa com álcool isopropílico. O projeto dos modelos experimentais é apresentado na Figura 47.

Figura 48 – Projeto do modelo experimental em pequena escala



Fonte: Autora

Os modelos construídos foram instrumentados para mensuração das deformações proporcionadas pela retração restringida na base do composto cimentício. Inicialmente se propôs o estudo da fixação dos extensômetros na parte inferior da placa de aço, a qual não fica em contato com o ECC, para que a leitura dos deslocamentos específicos fosse realizada de forma indireta. Para validar essa hipótese, se realizou um protótipo de pequena escala (Figura 49), o qual obteve resultados considerados satisfatórios, mantendo-se a mesma estratégia para os modelos.

Para a instrumentação dos modelos experimentais foram fixadas na parte inferior da placa de aço 8 *strain gages* de 10mm de comprimento e 120Ω de resistência, sendo as posições e direções mostradas nas Figura 50 e 51. Para a coleta dos dados de deformação por retração restringida na base, os *strain gages* foram conectados a cabos em uma ligação $\frac{3}{4}$ de ponte e plugados ao sistema de aquisição Spider 8 (600Hz), o qual foi conectado a um notebook e ao software Catman Easy. Cada um dos modelos foi monitorado durante 28 dias, sendo observados os dados de deformação coletados, a cura do material, possíveis fissuras, a rugosidade

superficial, a aderência entre o aço e o ECC e outras manifestações patológicas. Observa-se que não foram controladas as variáveis externas que poderiam influenciar as leituras das deformações, como umidade, temperatura, ruídos de equipamentos externos, dentre outras.

Figura 49 - Protótipo para validar a instrumentação indireta dos modelos observados o processo de cura dos traços e a abertura de fissuras



Fonte: Autora

Inicialmente foi proposta a construção de dois modelos experimentais que diferiam entre si apenas pelo traço de ECC, sendo o primeiro moldado com o ECC_{REF} (Figura 52) e o segundo com ECC_{CCA} (Figura 53). Entretanto, durante o acompanhamento do segundo modelo, observou-se o descolamento entre o composto cimentício e a superfície metálica, além da perda da leitura dos *strain gages* fixos na parte inferior da chapa de aço nos primeiros 10 dias de captura de dados (Figura 54). Essa falha na aderência entre os materiais foi associada à reutilização da placa metálica, a qual foi preparada para o segundo modelo apenas com lixamento manual e limpeza com álcool isopropílico. Dessa forma, foi necessária a construção de um terceiro modelo com o mesmo traço de ECC_{CCA}, porém com uma nova metodologia de preparação da superfície metálica (Figura 55). Para a construção do novo protótipo, esta foi polida mecanicamente com esmerilhadeira, em seguida, lixada manualmente de forma grosseira para não deixar a superfície completamente lisa e auxiliar na fixação do epóxi. Por fim, realizou-se a limpeza da chapa de aço com álcool isopropílico.

A cura dos protótipos foi realizada através de uma lona plástica removida após 5 dias no primeiro modelo e após 3 dias para o segundo e terceiro modelo. Essa diferenciação no tempo de retirada da lona ocorreu por verificação prática no primeiro modelo que, após o recolhimento

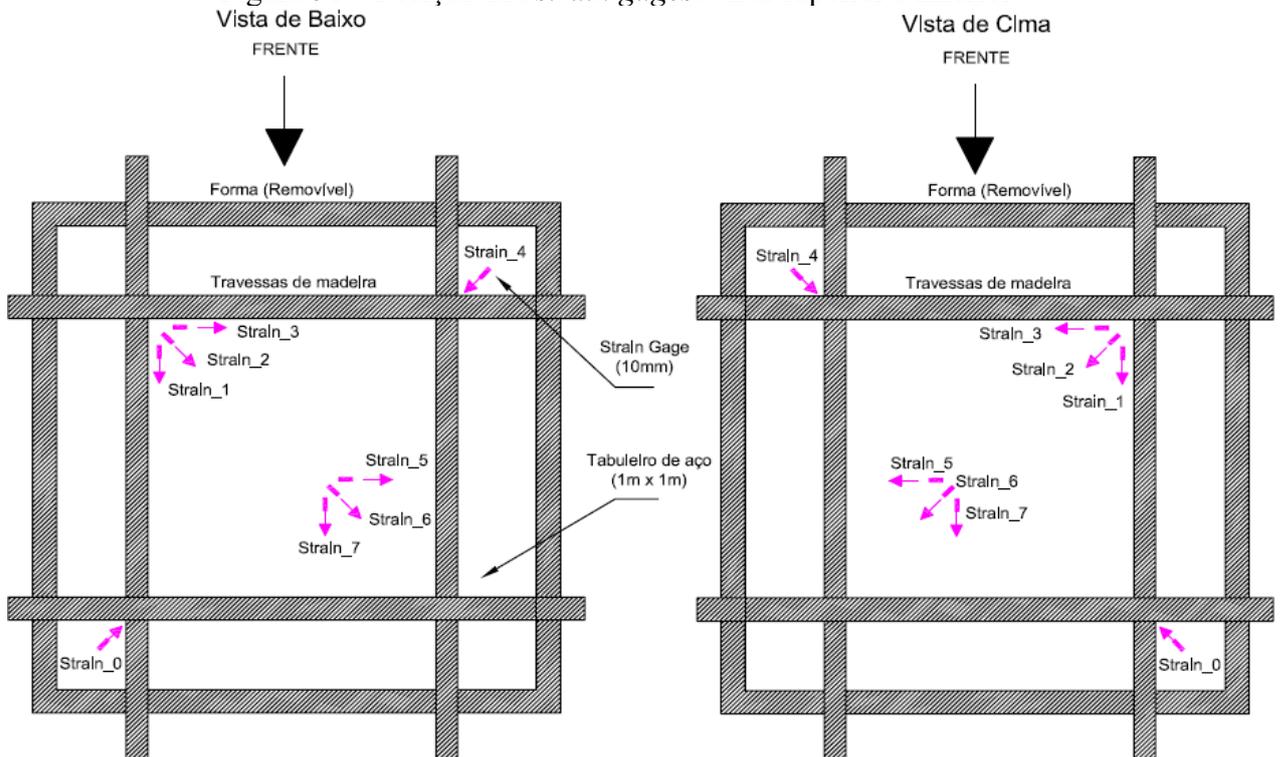
da cobertura plástica, sofreu um aumento expressivo nas deformações, sendo, portanto, considerado um período menor para o segundo e terceiro protótipo.

Figura 50 – Strain gages fixos na parte inferior da chapa metálica



Fonte: Autora

Figura 51 – Posição dos *strain gages*: vista superior e inferior



Fonte Autora

Figura 52 – Modelo Experimental 1: Traço ECCREF



Fonte: Autora

Figura 53 – Modelo Experimental 2: Traço ECCCCA



Fonte: Autora

Figura 54 – Modelo experimental 2: ECCCCA - Detalhes do descolamento entre o aço e o ECC



Fonte: Autora

Figura 55 – Modelo experimental 3: Traço ECC_{CCA}

Fonte: Autora

3.5.1. Ensaio de Macrotextura: Altura média da mancha de areia

A avaliação da macrotextura dos modelos experimentais foi realizada através do ensaio conhecido como Mancha de Areia (HS), normatizado pela NBR 16504:2016. Esse ensaio indica a condição superficial do revestimento para promover a drenagem da água presente entre o pneu e o pavimento, ou seja, a resistência à derrapagem. O procedimento também quantifica a distância entre os agregados individuais despontados no revestimento, os quais são responsáveis pela rugosidade superficial.

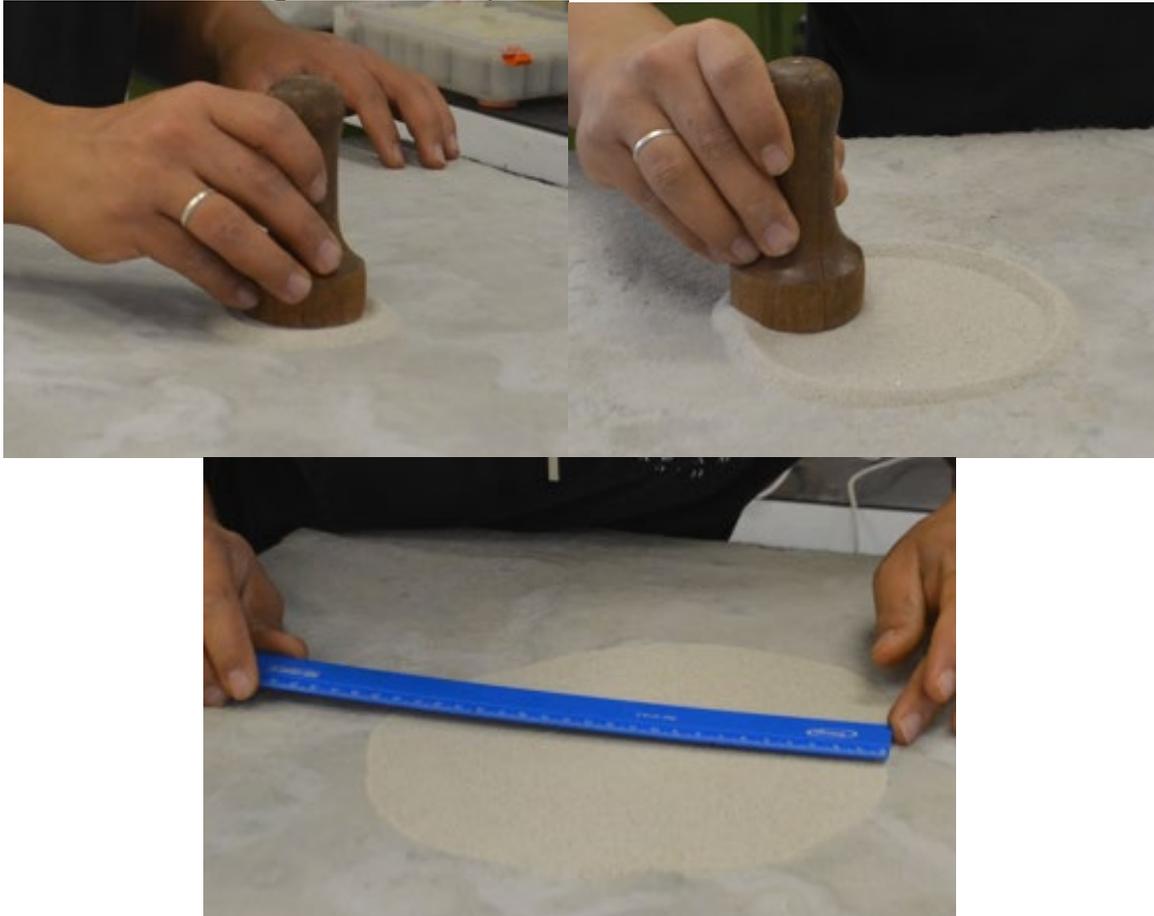
No ensaio da mancha de areia utiliza-se 2500mm³ de areia de granulometria padrão para realizar o preenchimento dos vazios presentes na superfície do revestimento através do espalhamento circular do material com um equipamento específico. Após o espalhamento total da areia é realizada a leitura de quatro diâmetros e, então, é calculada a altura da mancha de areia (HS). Para cada modelo foram executados 4 ensaios próximos às bordas (Figura 56). A classificação da altura da mancha de areia pode ser avaliada com base na Tabela 12.

Tabela 12 – Classes de macrotextura

Classe	Altura média da macha de areia (HS) (mm)
Muito fina ou fechada	$HS \leq 0,20$
Fina ou fechada	$0,20 \leq HS \leq 0,40$
Média	$0,40 \leq HS \leq 0,80$
Grosseira ou aberta	$0,80 \leq HS \leq 1,20$
Muito grosseira ou muito aberta	$HS > 1,20$

Fonte: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2006)

Figura 56 – Execução do ensaio de mancha de areia



Fonte: Autora.

3.5.2. Ensaio de Microtextura: Pêndulo Britânico

A determinação da microtextura dos modelos experimentais foi realizada com o ensaio do Pêndulo Britânico, normatizado pela NBR 16780:2019. De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006), esse equipamento avalia a superfície do revestimento determinando um valor em módulo referente à derrapagem da superfície, ou seja, uma medida escalar da aderência entre o pneu e o pavimento ou, também, do coeficiente de atrito cinemático. Hoerner *et al.*, 2003 mencionam que a microtextura apropriada possibilita uma parada adequada de veículos com velocidades inferiores à 72 km/h em pavimentos de concreto de cimento Portland, considerando condições de clima seco ou úmido.

A Figura 57 mostra o pêndulo britânico e a execução do ensaio, o qual é realizado na superfície molhada simulando a condição de chuva, considerada a mais crítica. Como resultado tem-se o valor de resistência à derrapagem (VRD), sendo a superfície classificada através da Tabela 13.

Figura 57 – Ensaio Pêndulo Britânico



Fonte: Autora.

Tabela 13 – Classes de microtextura de pavimentos

Classe	Referência VRD
Perigosa	< 25
Muito lisa	$25 \leq \text{VRD} \leq 31$
Lisa	$32 \leq \text{VRD} \leq 39$
Insuficientemente rugosa	$40 \leq \text{VRD} \leq 46$
Medianamente rugosa	$47 \leq \text{VRD} \leq 54$
Rugosa	$55 \leq \text{VRD} \leq 75$
Muito rugosa	$\text{VRD} > 75$

Fonte: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2006)

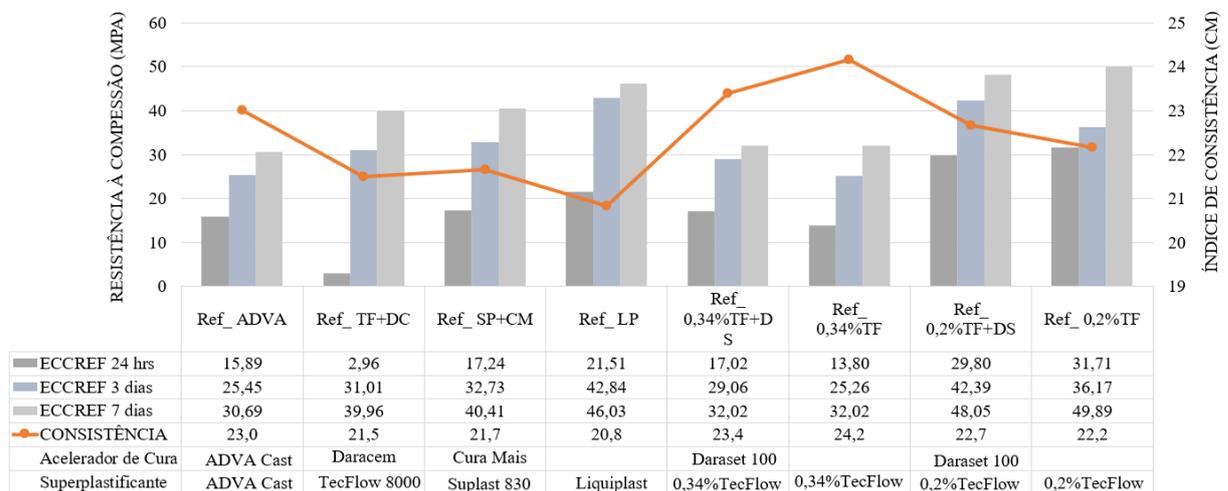
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item são apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento das etapas experimentais deste trabalho, com exceção da etapa exploratória 1, na qual foi realizada apenas a avaliação da experimentação do material no estado fresco.

4.1. Etapa 1

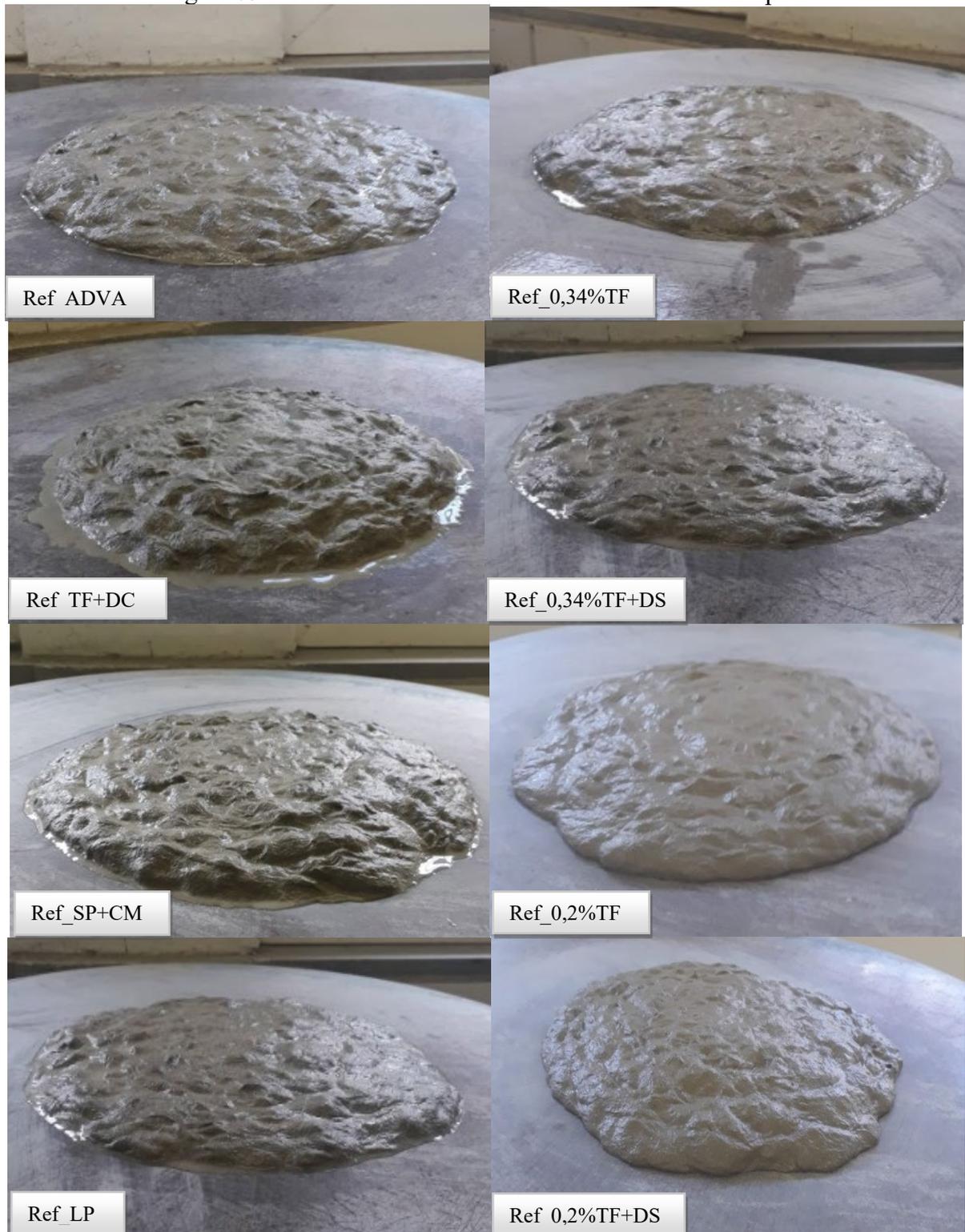
A determinação do melhor arranjo de aditivos considerou o índice de consistência, o qual demonstra a facilidade de manuseio do material no estado fresco, a resistência à compressão simples, resposta que caracteriza mecanicamente o concreto e os resultados de deformação por retração por secagem. A Figura 58 apresenta, para cada dosagem avaliada, os resultados combinados do índice de consistência (cm) e da evolução da resistência à compressão simples (MPa) em 24 horas, 3 dias e 7 dias. A consistência de cada combinação, resultado do ensaio de trabalhabilidade, também pode ser visualizada através da Figura 59. Ainda, a Figura 60 exibe a deformação média de retração por secagem ao longo do tempo para cada uma das combinações analisadas. A nomenclatura que representa cada um dos arranjos foi apresentada na Tabela 6 no item 3.3.3.

Figura 58 – Resistência à compressão simples (24hrs, 3 e 7 dias) x Trabalhabilidade - Etapa 1



Fonte: Autora

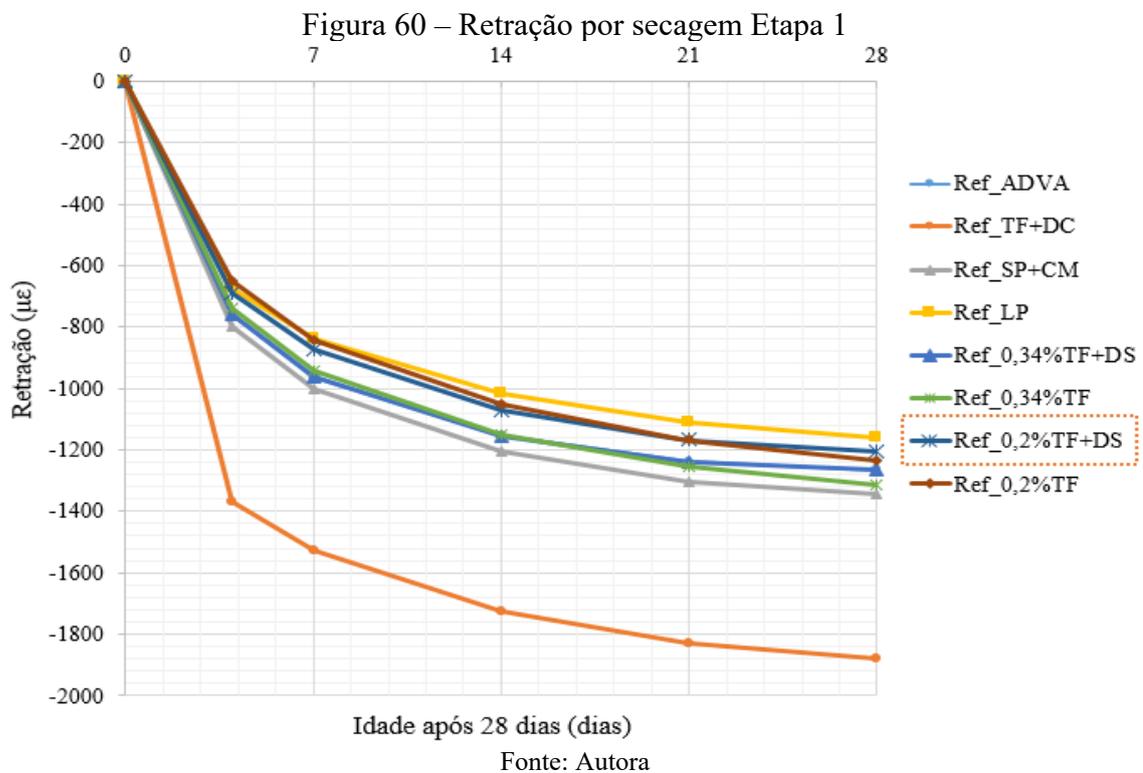
Figura 59 – Resultados do ensaio de trabalhabilidade - Etapa 1



Fonte: Autora.

Observa-se nos gráficos das Figura 58 e 60 que o traço que exibiu o melhor conjunto de resultados de RCS, trabalhabilidade e deformação por retração por secagem foi o Ref_0,2%TF+DS, sendo esse arranjo de aditivos escolhido para continuidade de estudo nas etapas posteriores. Essa combinação considerou a incorporação de 0,2% de superplastificante

Tecflow 8000 sobre o peso de cimento e aditivo acelerador de cura Daraset. Apesar dos resultados de resistência à compressão simples desse traço não exibirem os maiores valores nas idades avaliadas, foram considerados bons resultados médios. Essa conclusão é realizada considerando os dados de compressão simples para idade de 28 dias descritos por Righi (2015) e Rodriguez (2018), os quais foram de 45,00 MPa e 36,00 MPa, respectivamente, sendo esses inferiores aos 48,05 MPa encontrados para 7 dias neste estudo. Salienta-se que o traço descrito pelos autores, embora seja baseado no mesmo traço deste estudo, exibiu uma dosagem alta de superplastificante Tecflow 8000 e não considerou a incorporação de aditivo acelerador de cura.



A combinação Ref_0,2%TF+DS apresenta consistência adequada e não demonstra segregação da água de amassamento, conforme pode ser visualizado na Figura 59. Com relação à retração por secagem (Figura 60), obteve-se uma deformação média aos 28 dias de 1203,67 $\mu\epsilon$, sendo essa maior apenas que o traço REF_LP, o representa o arranjo com adição apenas do superplastificante Liquiplast-6300.

Avaliando as demais combinações estudadas exibidas Figura 58, da esquerda para a direita, o traço denominado Ref_ADVA, o qual utiliza o aditivo ADVA Cast 719 que combina as propriedades de superplastificante e de acelerador de cura, exibiu o menor resultado de resistência à compressão simples em 7 dias dentre os traços avaliados, valor abaixo da

expectativa. Com relação à sua trabalhabilidade, essa é satisfatória e exibe pequena segregação da água de amassamento (Figura 59).

A deformação por retração por secagem ($\mu\epsilon$), observada na Figura 60, é visivelmente maior no traço Ref_TF+DC, o qual considera a incorporação de superplastificante Tecflow8000 e aditivo acelerador de pega Daracem. Nessa combinação foram utilizados aditivos que, segundo o fabricante não são quimicamente compatíveis para garantir boa resistência nas primeiras idades, resultando não só em uma elevada retração como em uma baixa resistência à compressão em 24 horas (Figura 58). Com relação às demais idades, 3 dias e 7 dias, o traço exibe valores coerentes, porém não apresenta propriedades desejadas quando se espera uma cura rápida para liberação do pavimento de ECC ao tráfego de veículos. Verifica-se ainda na Figura 59 que esta combinação apresentou segregação.

Avaliando as combinações Ref_SP+CM, referente ao arranjo com superplastificante Suplast 830 e aditivo acelerador de cura Cura Mais, e Ref_LP, ambas apresentam resultados intermediários de resistência à compressão simples e trabalhabilidade, com uma pequena segregação (Figura 59). O traço Ref_LP exibiu os menores valores de deformação por retração, enquanto Ref_SP+CM apresentou o segundo maior valor.

Comparando os traços Ref_0,34%TF+DS e Ref_0,2%TF+DS, os quais utilizam a mesma combinação de aditivos, variando a proporção de superplastificante (TecFlow 8000) e mantendo o teor do aditivo de acelerador de cura em 0,5% (Daraset 100), pode-se verificar a ação do superplastificante na mistura. Da mesma forma, essa influência pode ser avaliada com a comparação entre os traços Ref_0,34%TF e Ref_0,2%TF, nos quais é incorporado apenas superplastificante à mistura. Observa-se que o aumento da quantidade de superplastificante provoca um acréscimo entre 6% a 10% nas leituras de retração. Também, conforme Midness *et al.* (2002), os agentes redutores de água das misturas, caso do superplastificante, podem aumentar a retração da mistura dependendo do tipo de concreto e tipo de aditivo.

Com relação aos valores obtidos para a resistência à compressão simples, exibidos no gráfico da Figura 58, ocorre uma redução da resistência relativa ao arranjo Ref_0,34%TF+DS em relação ao Ref_0,2%TF+DS. Esses decréscimos são de 12,78 MPa em 24 hrs, 13,33 MPa em 3 dias e 16,03 MPa em 7 dias. V. Li (2019) descreve que usar uma quantidade excessiva do aditivo superplastificante pode provocar atrasos na hidratação da mistura, fato que justifica a redução na resistência da combinação Ref_0,34%TF+DS. Da mesma forma, um maior teor de

superplastificante provoca um aumento no teor de água da mistura, o que também pode causar perdas na resistência.

Para avaliar a influência do aditivo acelerador de cura, pode-se comparar as combinações Ref_0,34%TF+DS com a Ref_0,34%TF e, da mesma forma, a Ref_0,2%TF+DS com a Ref_0,2%TF. Ou seja, comparam-se os arranjos que consideram a adição de superplastificante (Tecflow 800) e acelerador de cura (Daraset 100) com as combinações que incluem apenas o superplastificante (Tecflow 800) na dosagem da mistura. Considerando a resistência à compressão simples apresentada na Figura 58, para ambos os casos, a adição do acelerador de cura à mistura promove um ganho na resistência na idade de 3 dias e resultados próximos aos 7 dias. Com a idade de 3 dias, o arranjo Ref_0,34%TF+DS exibe uma RCS média cerca de 3,8 MPa maior que o Ref_0,34%TF, enquanto a combinação Ref_0,2%TF+DS apresenta um acréscimo na resistência média de 6,22 MPa comparada ao Ref_0,2%TF. Com relação à trabalhabilidade, essa é maior para os arranjos que consideram a adição do acelerador de pega (Ref_0,34%TF+DS e Ref_0,2%TF+DS), pois a inclusão de mais um aditivo ao traço proporciona um aumento na água da mistura.

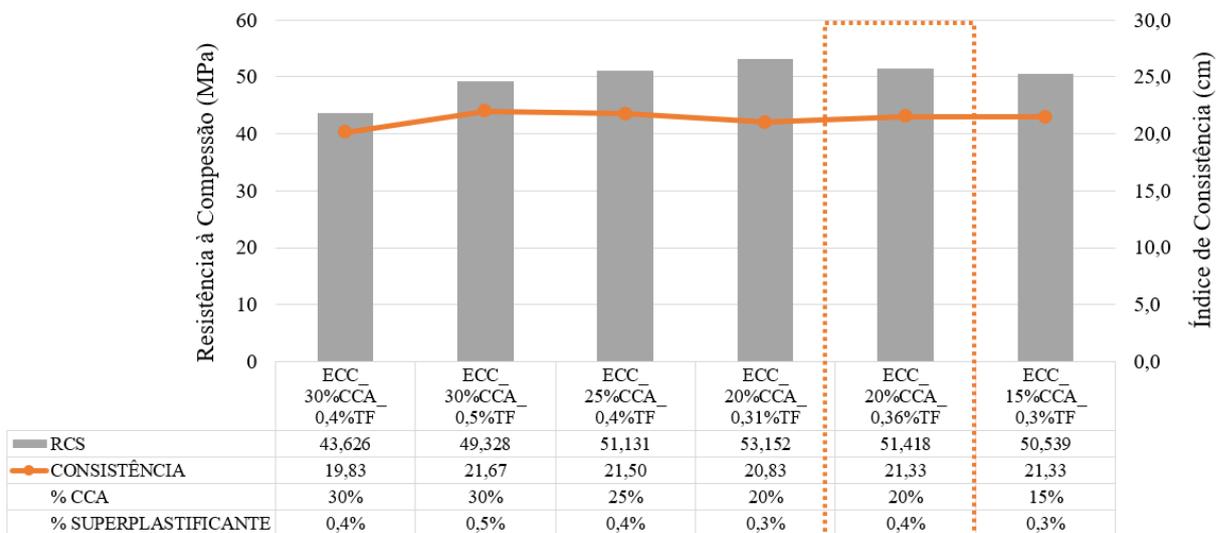
As curvas referentes às deformações de retração por secagem, exibidas na Figura 60, são muito próximas tanto para os arranjos Ref_0,34%TF+DS e Ref_0,34%TF, quanto para os traços Ref_0,2%TF+DS e Ref_0,2%TF. Como diferença, observa-se que as combinações com acréscimo de aditivo acelerador de cura (Ref_0,34%TF+DS e Ref_0,2%TF+DS) exibem uma tendência maior a estabilização das leituras aos 28 dias, enquanto os traços que foram dosados apenas com superplastificante (Ref_0,34%TF e Ref_0,2%TF) exibiram, comparativamente, maiores deformações.

Observando os resultados de retração por secagem dos arranjos avaliados neste estudo, representados na Figura 60, com exceção do Ref_TF+DC, todos apresentam uma curvatura semelhante, com maior crescimento das deformações associado às idades de 4 e 7 dias e com tendência à estabilização das leituras após 28 dias. Quando avaliados nesta idade, os resultados das deformações de retração por secagem de todas as combinações podem ser considerados próximos, variando de 1159,67 $\mu\epsilon$ a 1343,33 $\mu\epsilon$. Dessa forma, observa-se que a escolha do traço ECC_{REF} considerou mais as diferenças nos resultados de compressão.

4.2. Etapa Exploratória 2: Definição do teor de CCA e aditivos

O gráfico da Figura 61 apresenta os resultados de resistência à compressão simples (MPa), na idade de 3 dias, relacionados ao índice de consistência (cm) de cada arranjo avaliado na etapa exploratória 2. A consistência de uma dessas combinações, resultado do ensaio de trabalhabilidade, também pode ser visualizada através da Figura 62. O objetivo desta fase foi definir o percentual de substituição em massa do cimento Portland por cinza de casca de arroz, tendo como base a combinação de aditivo superplastificante Tecflow 8000 e acelerador de cura Daraset 100, o qual manteve o teor de 0,5% sobre o peso de aglomerante. Para tanto, foi necessário avaliar o percentual de CCA combinado com a dosagem de aditivo superplastificante (Tecflow 8000), de forma a conseguir a melhor combinação de resultados de resistência à compressão simples e trabalhabilidade. A nomenclatura que representa cada arranjo avaliada foi apresentada na Tabela 8 no item 3.3.4.

Figura 61 – Resistência à compressão simples (3 dias) x Índice de consistência (cm) - Etapa Exploratória 2

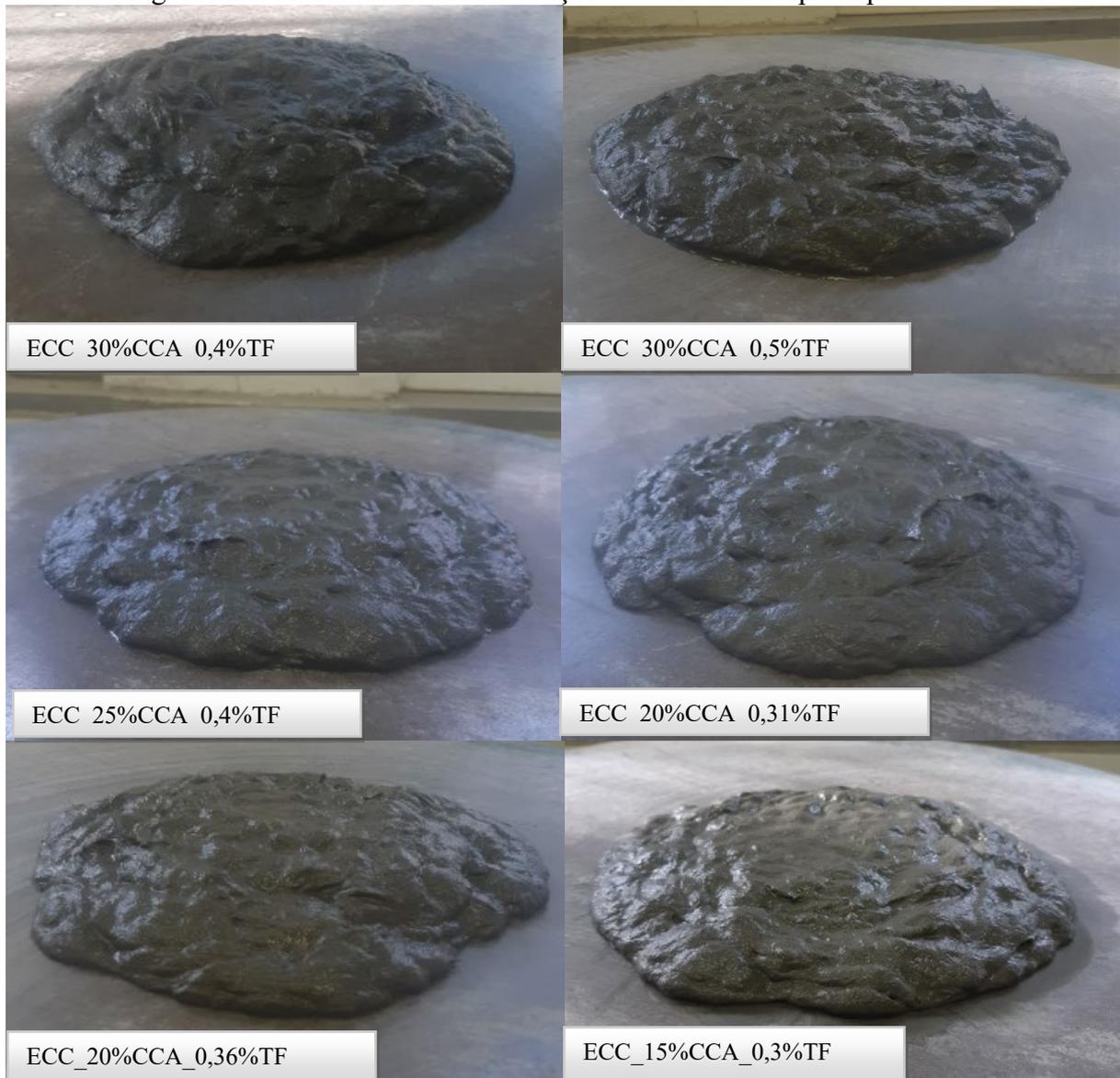


Fonte: Autora

Observa-se na Figura 61 que, mantendo-se o teor de incorporação de cinza de casca de arroz em 30% e variando o percentual de superplastificante, o traço ECC_30%CCA_0,4%TF, com 0,4% de TecFlow 8000, exibe valores menores de resistência à compressão aos 3 dias do que o ECC_30%CCA_0,5%TF, com 0,5% de TecFlow 8000. Considerando a consistência dos traços, quantificada no gráfico da Figura 61 e na exibida na Figura 62, percebe-se que o arranjo ECC30%CCA_0,4%TF não teve adicionada uma quantidade de superplastificante suficiente para proporcionar a mistura adequada de todos os componentes, prejudicando tanto sua

resistência quanto trabalhabilidade. V. Li (2019) menciona que uma quantidade mínima de superplastificante é necessária para revestir totalmente as partículas sólidas e proporcionar uma reologia ótima da pasta de cimento. Considerando que a CCA possui uma curva granulométrica com diâmetro médio das partículas (15,06 μ m) levemente inferior ao cimento (17,46 μ m), a CCA exibe uma superfície específica maior, demandando assim uma quantidade superior de aditivo superplastificante (Tecflow 8000).

Figura 62 – Trabalhabilidade dos traços avaliados na Etapa Exploratória 2



Fonte: Autora

Com base no gráfico da Figura 61, os traços com incorporação de 20% de CCA, tanto o ECC_20%CCA_0,31%TF quanto o ECC_20%CCA_0,36%TF, exibiram os maiores valores de resistência à compressão simples do que os com 30%, 25% e 15% de adição desse material suplementar cimentício. Dessa forma, optou-se pela escolha do traço

ECC_20%CCA_0,36%TF, referente à dosagem com adição de 20% de CCA e 0,36% de superplastificante (Tecflow 8000), a qual exibiu a melhor combinação de resultados de trabalhabilidade (21,33cm) e resistência à compressão simples em 3 dias (51,418 MPa).

Avaliando a consistência de todos os arranjos considerados nesta etapa, evidenciada na Figura 62, visualiza-se que, de uma forma geral, o ECC com incorporação parcial de cinza de casca de arroz apresenta um traço menos trabalhável que o ECC sem adições desse material. Comparando a consistência do traço adotado nesta etapa ECC_20%CCA_0,36%TF (21,33cm) com a do traço Ref_0,2%TF+DS escolhido na Etapa 1 (22,7cm), observa-se que o traço ECC_20%CCA_0,36%TF exibe uma maior dificuldade de manuseio do material no estado fresco. A incorporação da CCA aumenta a quantidade de finos na mistura, diminuindo sua trabalhabilidade e necessitando maiores teores de água ou aditivo superplastificante.

Por fim, salienta-se que nesta dissertação, a definição do percentual de substituição em massa do cimento por cinza de casca de arroz não foi um objetivo principal. Desta forma, a discussão dos resultados foi abordada de maneira simplificada.

4.3. Etapa 2: Estudo dos traços

Após a escolha dos traços, foi realizada a determinação das propriedades mecânicas e de retração de cada uma das dosagens, denominadas como ECC_{REF} e ECC_{CCA}. Para tanto, foram avaliados os resultados da curva de evolução de resistência à compressão simples ao longo do tempo, o comportamento dos materiais à tração na flexão, a retração livre e por secagem e o módulo de elasticidade e flexural de cada um dos traços.

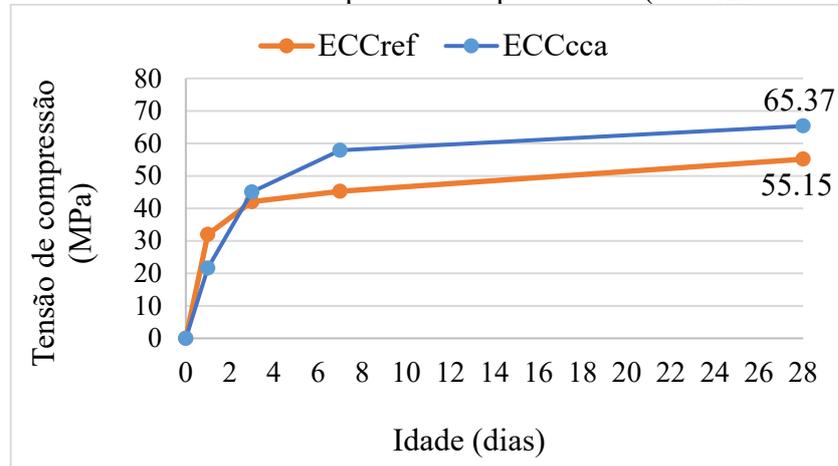
4.3.1. Resistência à compressão simples (RCS)

A Figura 63 apresenta os resultados de resistência à compressão simples (f_c) dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA} considerando os tempos de cura de 24 horas, 3, 7 e 28 dias. Da mesma forma, a Tabela 14 apresenta os valores e os desvios padrão (σ) encontrados e relaciona esses com os dados descritos por Righi (2015) e Rodríguez (2018) para o mesmo traço referência na idade de 28 dias.

Observa-se no gráfico da Figura 63 e na Tabela 14 que, exceto na idade de 24 horas, o traço ECC_{CCA} apresentou maiores resultados de resistência à compressão simples que o ECC_{REF}. Esse comportamento ocorre devido à granulometria da cinza de casca de arroz ser mais fina que a

do cimento. Dessa forma, além das reações químicas associadas à atividade pozolânica da CCA, esse material suplementar cimentício auxilia no preenchimento dos vazios do concreto, atuando de forma associada como filler na mistura, aumentando assim a resistência do material.

Figura 63 – Resistência à compressão simples média (ECC_{REF} X ECC_{CCA})



Fonte: Autora

Tabela 14 – Valores de resistência à compressão simples média (MPa)

	24 horas		3 dias		7 dias		28 dias	
	f_c (Mpa)	σ						
ECC_{REF}	31,97	3,18	45,05	3,83	45,25	4,21	55,15	6,12
ECC_{CCA}	21,62	1,10	45,05	3,62	57,89	4,72	65,37	5,55
Righi (2015)	-	-	-	-	-	-	45,00	-
Rodriguez (2018)	-	-	-	-	-	-	36,00	-

Com relação aos valores de resistência à compressão do ECC_{CCA} em 24 horas, Ribeiro (2021) descreve que as reações dos materiais cimentícios suplementares pozolânicos promovem uma redução na liberação de calor das reações de hidratação do concreto, as quais são mais tardias quando existe a incorporação destes materiais na mistura. Comprovando o descrito pelo autor, o traço com CCA demonstrou maior resistência que o ECC_{REF} apenas após a idade de 3 dias. Da mesma forma, Neville (2016) menciona que a incorporação da cinza de casca de arroz contribui para que o aumento da resistência do concreto ocorra apenas após 1 a 3 dias de idade.

Considerando que os traços estudados mantêm as relações de água/aglomerante (0,75) e areia/aglomerante (0,34), tanto o ECC_{CCA} quanto o ECC_{REF} , demonstraram maiores resistências à compressão simples na idade de 28 dias que os valores descritos por Righi (2015) e Rodríguez (2018), exibidos na Tabela 14. Esses autores consideram a incorporação um teor maior de aditivo superplastificante (TecFlow 8000) e, diferente deste estudo, não adicionam acelerador de cura na dosagem dos traços. Observa-se assim que, tanto a adição de acelerador de cura, quanto a diminuição do teor de superplastificante, trazem melhorias à mistura em termos de

resistência à compressão considerando os resultados obtidos pelos estudos anteriores desenvolvido no LEME/UFRGS.

4.3.2. Resistência à tração na Flexão (RTF)

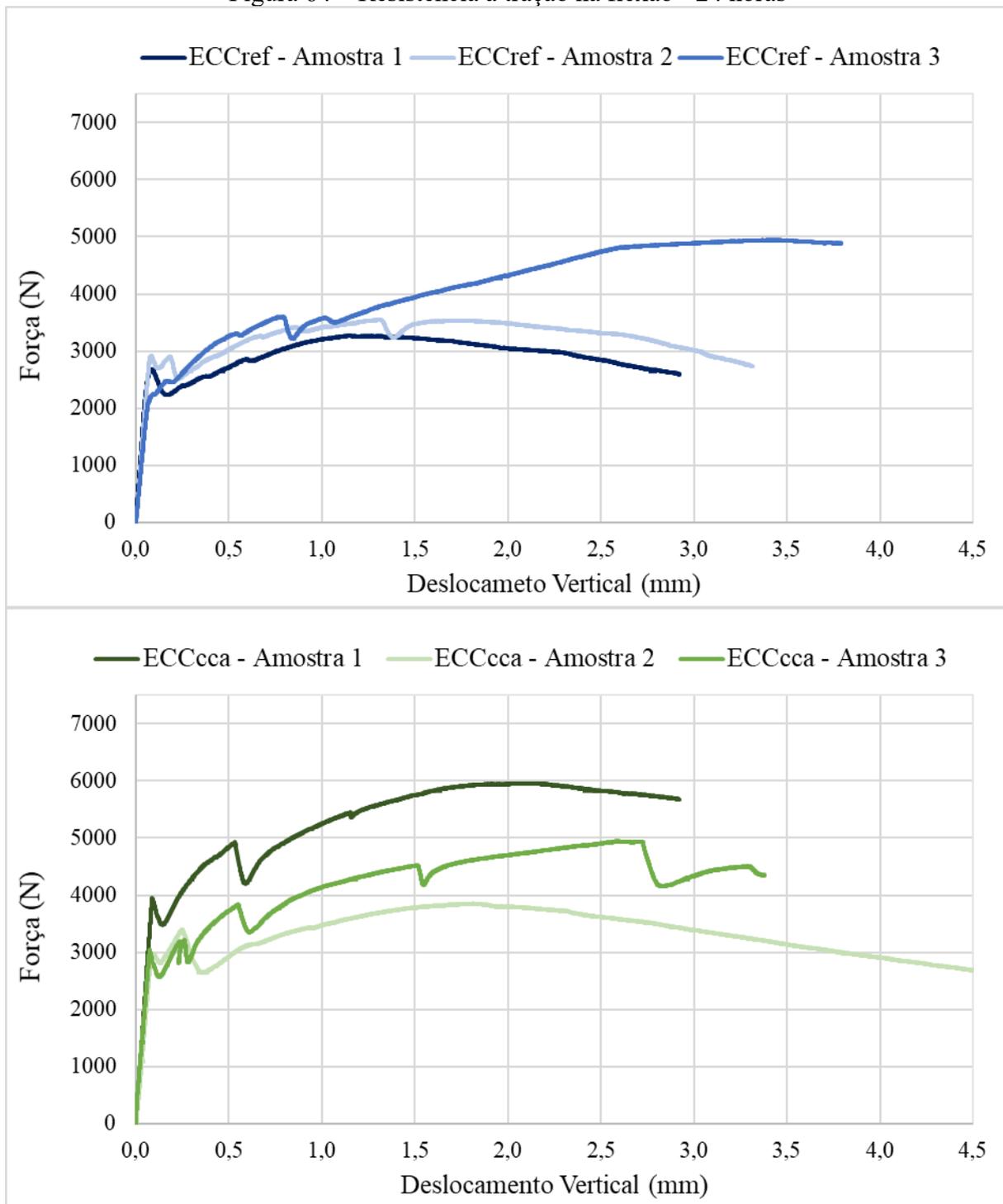
A Tabela 15 exhibe os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA}, sendo P_1 a força (N), f_1 a tensão (MPa) e δ_1 o deslocamento vertical (mm) no primeiro pico de carregamento, onde o elemento apresenta um comportamento linear elástico e ocorre a primeira fissura do material, e P_P a força (N) e δ_P o deslocamento vertical (mm) correspondente ao maior pico de carga do ensaio. Neste ponto não foram calculadas as tensões correspondentes f_P por não se tratar de um trecho linear elástico. Para avaliação da tensão neste trecho não linear, a tabela exhibe a tensão calculada em $L/150$ ($f_{T,150}^D$), ou seja, no ponto em que o deslocamento é 2mm, e a taxa de resistência à flexão equivalente ($R_{T,150}^D$). Ainda, de forma comparativa, são expostos os dados relatados por Righi (2015) e Rodríguez (2018) para o traço referência com 28 dias de cura, o qual exhibe a mesma relação água/cimento que os traços deste estudo. As Figura 64 a 67 exibem os gráficos que relacionam a força de flexão (N) pelo deslocamento (mm) para 3 amostras dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA} nas idades de 24 horas, 3, 7 e 28 dias, respectivamente. O comportamento fissurado dos corpos de prova após a realização dos ensaios, para todas as idades, pode ser também visualizado através das Figuras 68 até 75.

De forma geral, exceto para o traço ECC_{CCA} aos 28 dias, as amostras ensaiadas de ECC_{REF} e ECC_{CCA} exibiram comportamento à flexão próximo ao *deflection hardening* nas idades analisadas, sendo $P_1 < P_P$. Neste ensaio, o desempenho dos corpos de prova pode ser dividido em duas parcelas. Na primeira, o carregamento das vigas iniciou com um trecho linear elástico até ocorrer a abertura da primeira fissura (P_1). Neste ponto ocorre a ruptura da matriz cimentícia, a qual permanece resistindo devido a incorporação de fibras nos traços avaliados. Após, na segunda parcela, a trajetória das curvas apresentou um desempenho elástico não linear, ocorrendo o processo de microfissuração em percentual reduzido e conseqüente ganho de ductilidade, com aumento da carga até alcançar o ponto de resistência máxima à flexão (P_P). Ao atingir este valor, ocorreu uma relaxação da carga com perda de resistência. Nesta fase o deslocamento vertical não é mais proporcional à carga aplicada. Nas Figuras 64 a 67 pode-se observar perturbações nas linhas que representam cada corpo de prova ensaiado, as quais demonstram a abertura de fissuras e decorrente resistência da matriz, reação particular deste tipo de compósito cimentício reforçado com fibras.

Tabela 15 – Resultados de resistência à tração na flexão

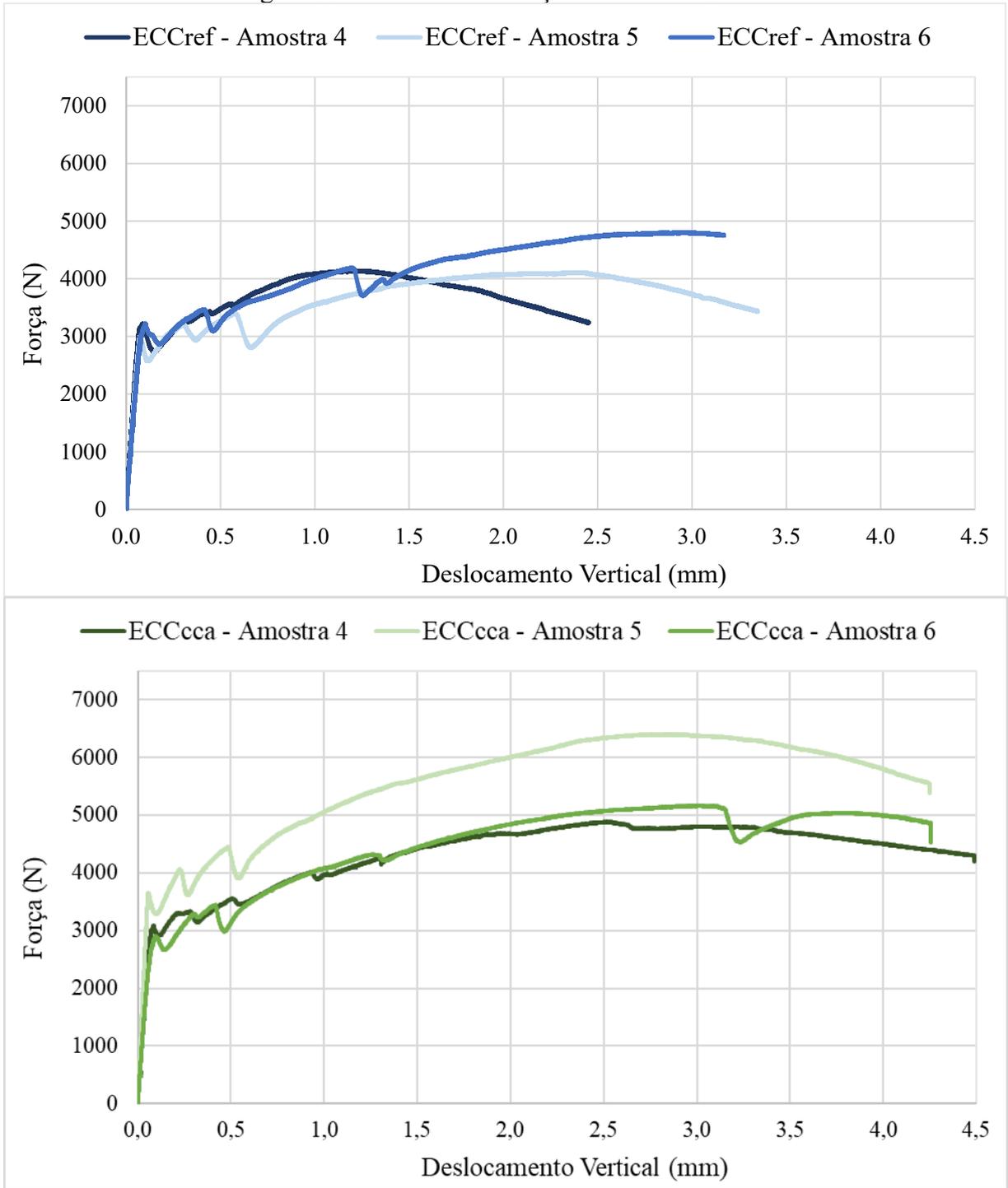
	Idade	P ₁ (N)	P ₁ média (MPa)	δ ₁ (mm)	f ₁ (MPa)	f ₁ média (MPa)	σ (MPa)	CV	P _P (N)	P _P médio (MPa)	δ _P (mm)	σ (MPa)	CV	f _{T,150} ^D	f _{T,150} ^D médio (Mpa)	R _{T,150} ^D
ECC _{REF} - Amostra 1		2681,17		0,088	3,22				3271,50		3,513			5,339		
ECC _{REF} - Amostra 2	24 hrs	2890,03	2601,32	0,087	3,47	3,12	0,33	11%	3547,26	3922,27	3,847	734,02	22%	5,365	4,95	158%
ECC _{REF} - Amostra 3		2232,75		0,087	2,68				4948,05		4,137			4,137		
ECC _{REF} - Amostra 4		3211,05		0,088	3,85				4138,27		1,213			4,421		
ECC _{REF} - Amostra 5	3 dias	2986,57	3137,64	0,072	3,58	3,77	0,13	3%	4109,00	4349,90	2,383	320,20	8%	4,137	4,35	116%
ECC _{REF} - Amostra 6		3215,29		0,102	3,86				4802,41		2,975			4,494		
ECC _{REF} - Amostra 7		3958,26		0,085	4,75				4256,65		0,367			4,482		
ECC _{REF} - Amostra 8	7 dias	3559,64	3714,53	0,089	4,27	4,46	0,21	5%	4163,28	4255,25	1,610	74,53	2%	4,371	4,46	100%
ECC _{REF} - Amostra 9		3625,69		0,079	4,35				4345,83		1,817			4,539		
ECC _{REF} - Amostra 10		5886,79		0,104	7,06				6375,08		1,290			6,916		
ECC _{REF} - Amostra 11	28 dias	4396,74	4600,78	0,112	5,28	5,52	1,17	21%	4619,79	5284,73	1,390	777,17	12%	5,055	5,68	105%
ECC _{REF} - Amostra 12		3518,83		0,070	4,22				4859,34		1,387			5,078		
ECC _{CCA} - Amostra 1		3940,01		0,087	4,73				5960,00		2,076			6,013		
ECC _{CCA} - Amostra 2	24 hrs	2964,11	3316,04	0,092	3,56	3,98	0,53	13%	3852,76	4919,42	1,814	860,48	14%	4,019	4,90	123%
ECC _{CCA} - Amostra 3		3044,01		0,074	3,65				4945,49		2,593			4,675		
ECC _{CCA} - Amostra 4		3068,02		0,080	3,68				4890,67		2,514			4,660		
ECC _{CCA} - Amostra 5	3 dias	3648,51	3207,56	0,057	4,38	3,85	0,38	10%	6408,51	5489,86	2,789	659,55	13%	5,840	5,05	131%
ECC _{CCA} - Amostra 6		2906,15		0,100	3,49				5170,39		3,006			4,648		
ECC _{CCA} - Amostra 7		3786,63		0,072	4,54				3993,60		1,367			4,335		
ECC _{CCA} - Amostra 8	7 dias	4357,29	4077,52	0,075	5,23	4,89	0,28	6%	6536,24	5187,75	2,872	1043,75	26%	6,108	5,30	108%
ECC _{CCA} - Amostra 9		4088,64		0,071	4,91				5033,41		1,327			5,470		
ECC _{CCA} - Amostra 10		6402,14		0,098	7,68				6039,25		0,857			6,611		
ECC _{CCA} - Amostra 11	28 dias	7078,20	6705,54	0,133	8,49	8,05	0,34	4%	6598,72	6039,97	0,933	455,92	8%	7,193	6,55	81%
ECC _{CCA} - Amostra 12		6636,28		0,100	7,96				5481,94		0,590			5,847		
ECC _{REF} - Rodrigues (2018)	28 dias	-	-	-	-	4,50	0,4	5%								
ECC _{REF} - Righi (2015)	28 dias	-	-	-	-	5,50	0,59	11%								

Figura 64 – Resistência à tração na flexão - 24 horas



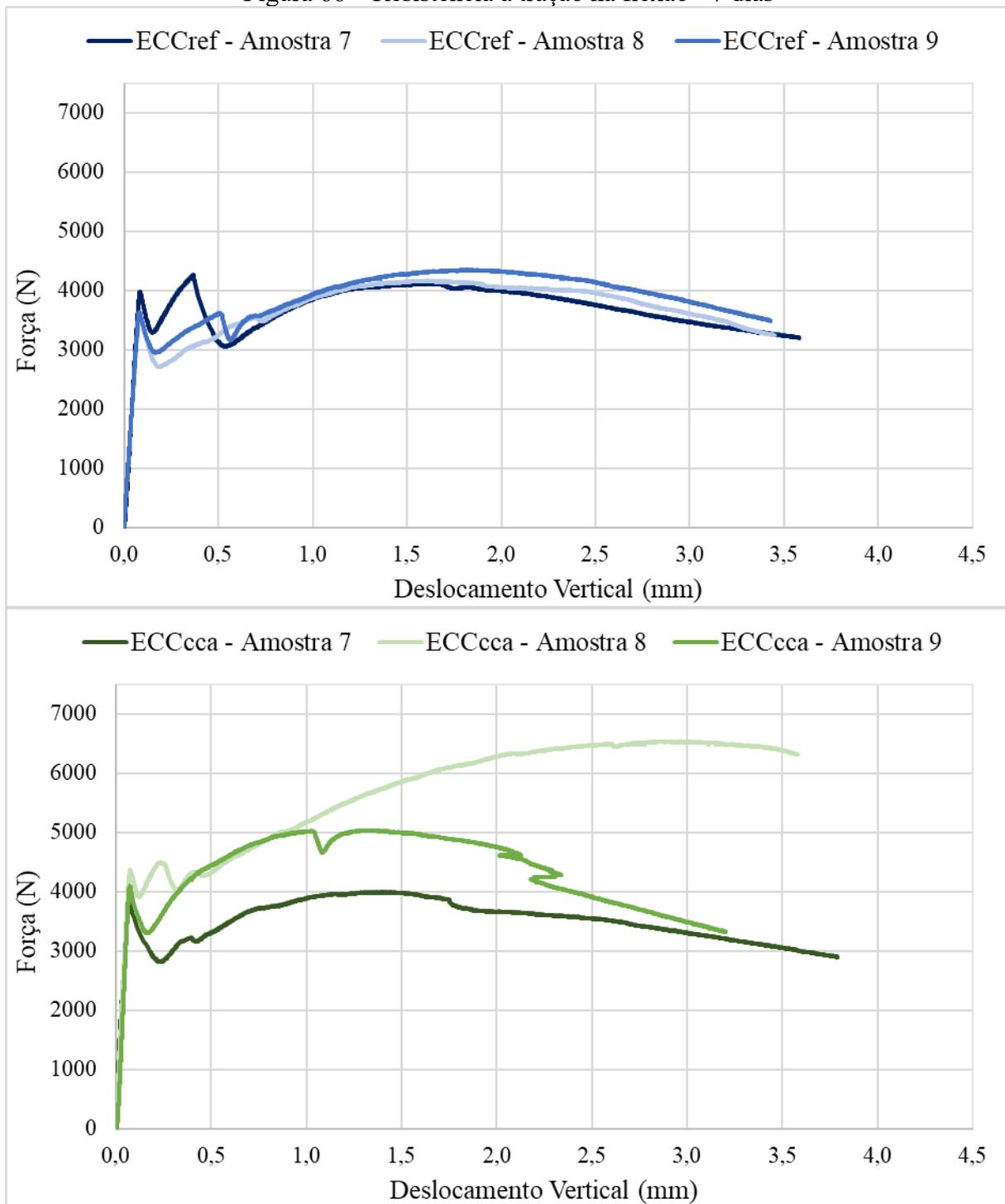
Fonte: Autora.

Figura 65 – Resistência à tração na flexão – 3 dias



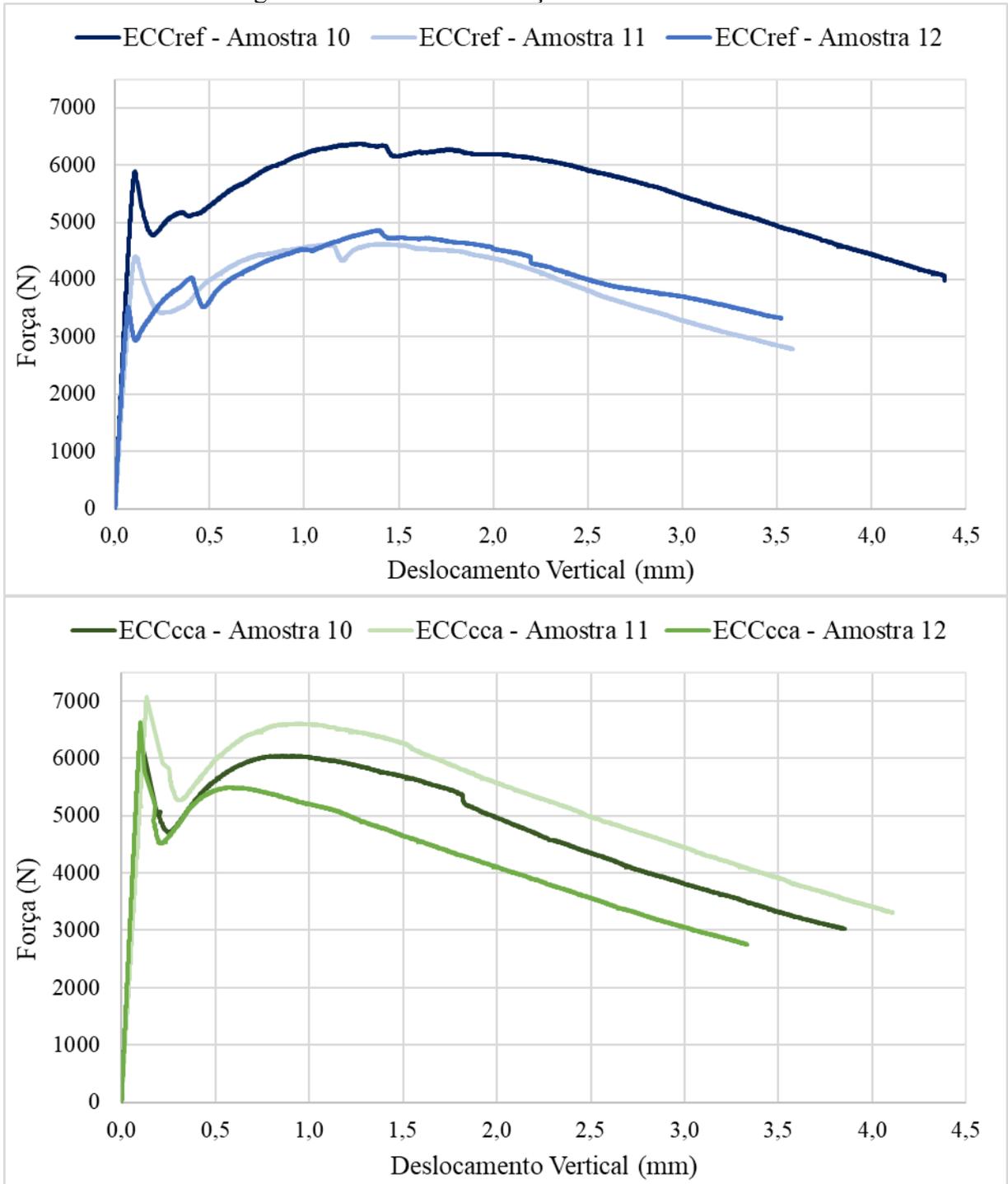
Fonte: Autora.

Figura 66 – Resistência à tração na flexão - 7 dias



Fonte: Autora.

Figura 67 – Resistência à tração na flexão – 28 dias



Fonte: Autora.

Figura 68 – Corpos de prova do traço ECC_{REF} após o ensaio de tração na flexão (24 horas)



Fonte: Autora.

Figura 69 – Corpos de prova do traço ECC_{REF} após o ensaio de tração na flexão (3 dias)



Fonte: Autora

Figura 70 – Corpos de prova do traço ECCREF após o ensaio de tração na flexão (3 dias)



Fonte: Autora.

Figura 71 – Corpos de prova do traço ECCREF após o ensaio de tração na flexão (28 dias)



Fonte: Autora

Figura 72 – Corpos de prova do traço ECC_{CCA} após o ensaio de tração na flexão (24 horas)



Fonte: Autora.

Figura 73 – Corpos de prova do traço ECC_{CCA} após o ensaio de tração na flexão (3 dias)



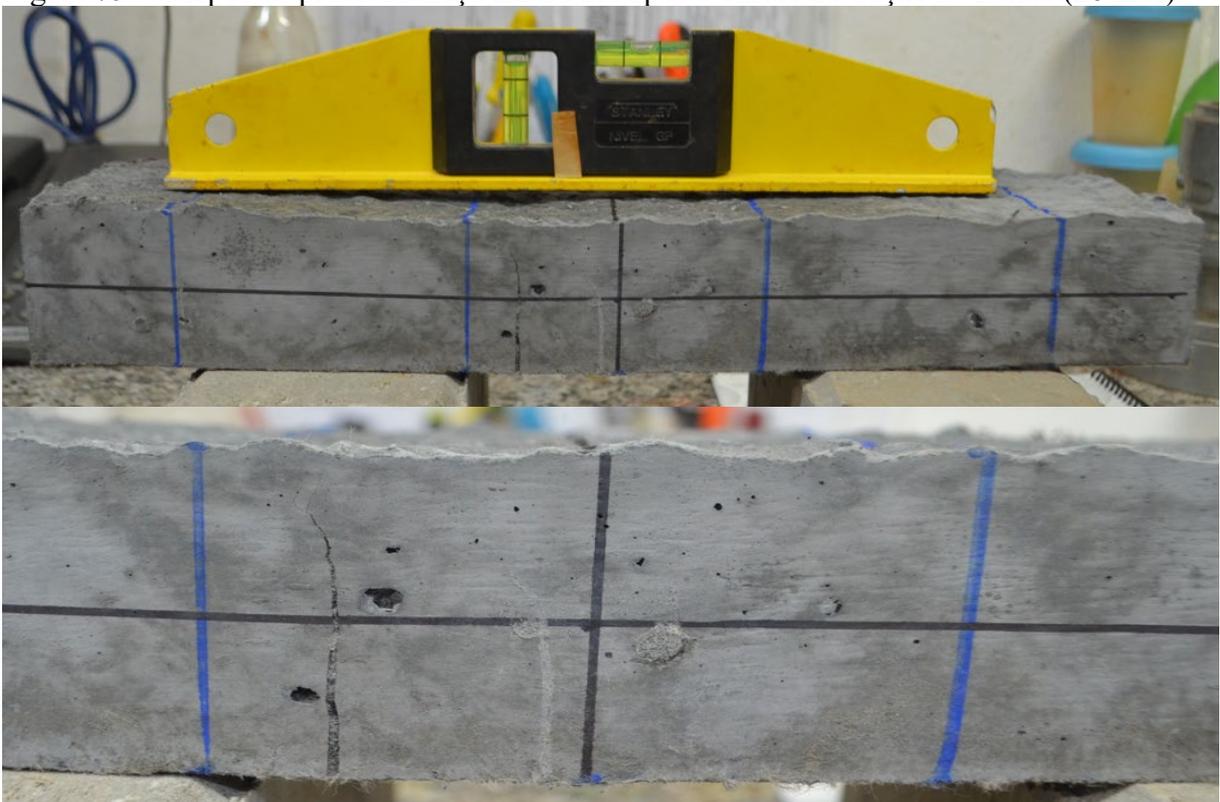
Fonte: Autora

Figura 74 – Corpos de prova do traço ECCCCA após o ensaio de tração na flexão (7 dias)



Fonte: Autora.

Figura 75 – Corpos de prova do traço ECCCCA após o ensaio de tração na flexão (28 dias)



Fonte: Autora

Em relação à abertura de fissura dos corpos de prova, visíveis através das Figuras 68 a 75 e representadas através das perturbações das curvas dos gráficos das Figuras 64 a 67, verifica-se que as amostras não desenvolveram um número significativo de fissuras, contrariando a expectativa inicial. Dessa forma, verifica-se que os traços não desenvolveram um comportamento puramente *deflection hardening*, com um percentual reduzido de microfissuração. Como foram realizadas pequenas alterações no traço originalmente utilizado nas pesquisas no LEME, como a incorporação de aditivo acelerador de cura, essas modificações podem ter provocado a variação do comportamento de múltipla fissuração do material. Também, a escolha inicial dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA} se baseou nos resultados de resistência à compressão dos compostos e não na resistência à tração na flexão ou tração direta, característica mecânica que não traz informações quanto à taxa de microfissuração desses materiais. Dessa forma, embora os traços avaliados neste estudo tenham exibido bons resultados frente à flexão, eles não podem ser classificados como *Engineered Cementitious Composites*, sendo definidos como compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados por fibras. Da mesma forma, não foi realizada a caracterização dos materiais à tração direta, não sendo possível determinar se esses apresentam comportamento de ruptura *strain hardening*.

Analisando o comportamento particular de cada traço, o ECC_{REF} exibiu uma tensão média de resistência à primeira fissura (f_1) de 3,12 MPa em 24 horas, 3,77 MPa em 3 dias, 4,46 MPa em 7 dias e 5,52 MPa em 28 dias. Neste ponto, as respectivas forças médias P_1 foram de 2601,32N, 3137,64N, 3714,53N e 4600,78N. Estes valores correspondem, nesta ordem, a cerca de 66,3%, 72,1%, 87,3% e 87% da força de pico (P_p) dos ensaios, demonstrando que com maiores idades a resistência à primeira fissura se aproxima do valor correspondente ao pico.

O ECC_{CCA} apresentou uma resistência média à primeira fissura de 3,98 MPa em 24 horas, 3,85 MPa em 3 dias, 4,89 MPa em 7 dias e 8,05 MPa em 28 dias, valores superiores em cerca de 28%, 2%, 10% e 46% aos correspondentes ao ECC_{REF}. Neste ponto, as respectivas forças médias P_1 do ECC_{CCA} foram de 4919,42 N, 5489,86 N, 5187,75 N e 6705,54 N. Observa-se para este traço que, aos 3 dias, a tensão de tração à flexão média no ponto de primeira fissura é inferior ao valor para 24 horas, sendo os coeficientes de variação entre os ensaios dos ensaios de 10% e 13%, respectivamente. Assim como mencionado na análise do ensaio de compressão simples, salienta-se que os materiais com características pozolânicas tem o início das reações entre 1 e 3 dias, justificando essa pequena diferença entre os resultados destas idades. Da mesma forma, os compósitos reforçados com fibras apresentam variabilidade de resultados entre si

devido à diferente dispersão das fibras na matriz cimentícia e, também, a outras variáveis não controláveis envolvidas no processo de pega e moldagem destes materiais.

Diferente das demais idades, aos 28 dias as amostras do traço ECC_{CCA} descreveram um comportamento *deflection softening* característico de um compósito com fissura única. Neste ensaio os corpos de prova apresentaram um desempenho inicial elástico linear até a primeira fissura, onde ocorreu uma queda da resistência e posterior aumento, porém em uma intensidade menor que P_1 , sendo neste caso $P_1 = P_p$. De acordo com Ribeiro (2021), este processo de ruptura do material ocorre devido ao arrancamento das fibras da matriz cimentícia, formando apenas uma abertura. Ainda, segundo Leung (1996), no ponto em que ocorre a primeira fissura, correspondente a força P_1 , os corpos de prova exibem uma abertura muito pequena, sendo a tensão necessária para o início de sua propagação maior que a tensão de ligação proporcionada pelas fibras. Ou seja, após a formação da primeira abertura, a capacidade de carga do material não ultrapassa a primeira resistência à fissura (f_1), formando assim uma falha com uma única trinca e limitando a resistência posterior do ensaio à capacidade das fibras. Esse comportamento pode ser visualizado através da Figura 75.

A avaliação da ductilidade das Figura 64 até 67 pode ser realizada de forma visual e através do seu comportamento fissurado, caracterizado pela tensão calculada em $L/150$ ($f_{T,150}^D$) e pela relação de resistência à flexão equivalente ($R_{T,150}^D$), dados apresentados na Tabela 15. Destaca-se que todas as amostras, independentemente da idade e traço, demonstraram capacidade de sustentar grandes deformações verticais até o ponto de resistência máxima, onde apresentam uma queda na capacidade de forma *deflection softening*. Dessa forma, exceto para os corpos de prova com 28 dias de cura do traço ECC_{CCA}, tem-se que $f_{T,150}^D \geq f_1$ e $R_{T,150}^D \geq 100\%$, ou seja, a tensão suportada pelas amostras em 2mm é maior ou aproximadamente igual a tensão calculada no ponto de abertura da sua primeira fissura. Considerando a idade de 28 dias do traço ECC_{CCA}, cujos resultados estão apresentados na Figura 67, percebe-se que há uma menor ductilidade que o ECC_{REF} por apresentar um comportamento *deflection softening* já após a primeira e única fissura, sendo $f_{T,150}^D < f_1$ e $R_{T,150}^D < 100\%$.

Observando os dados exibidos na Tabela 15 e comparando os resultados de flexão aos 28 dias, tanto o ECC_{REF} quanto o ECC_{CCA} apresentam maiores resistências à primeira fissura (f_1) que o traço referência descritos por Righi (2015) e Rodriguez (2018), o qual exibe a mesma relação água cimento que as misturas avaliadas. Em termos percentuais, o ECC_{REF} obteve um valor muito próximo ao descrito por Righi (2015), mas exibiu um acréscimo na resistência à tração

na flexão cerca de 22,7% que a referência de Rodriguez (2019). Com relação ao ECC_{CCA} , esse exibiu um resultado aos 28 dias 46% maior que Righi (2015) e 79% superior que Rodriguez (2019). Esses ganhos na resistência podem ser explicados pela incorporação de aditivo acelerador de cura nos traços avaliados neste estudo. Também, pela redução significativa na incorporação de superplastificante para teores que não apresentaram segregação, a qual é responsável pela falta de homogeneidade e consequente perda de resistência final nas misturas.

Por fim, avaliando numericamente a oscilação das respostas experimentais, os coeficientes de variação (CV) calculados para as resistências médias à primeira fissura para o ECC_{REF} ficaram entre 2% e 21% e, para o ECC_{CCA} em torno de 8% a 20%. Esses percentuais expressam a variabilidade dos ensaios que, neste caso, pode ser considerada de média a baixa, sendo essa classificação aceitável para compósitos reforçados com fibras que exibem diferente distribuição de fibras em sua matriz cimentícia e orientação aleatória.

4.3.3. Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade (E_{ci}) aos 28 dias para o ECC_{REF} e ECC_{CCA} , baseado na NBR 8522:2017, são apresentados na Tabela 16. De forma complementar, o módulo flexural obtido através do ensaio de tração na flexão (E_{cc}) também foi determinado para os mesmos traços através da relação de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, obtida pela tangente do trecho linear do gráfico resultante do ensaio de tração na flexão, momento em que as amostras se encontram em um estado não fissurado. A evolução do módulo flexural de acordo com a idade de cura é exibida na Tabela 17.

Tabela 16 – Módulo de elasticidade – E_{ci} (GPa)

Amostra	Idade (dias)	Módulo (GPa)	Módulo Médio (GPa)	σ (GPa)
ECC_{REF} – Amostra1	28	20,565		
ECC_{REF} – Amostra2	28	21,320	20,8	0,43
ECC_{REF} – Amostra3	28	20,599		
ECC_{CCA} – Amostra1	28	28,570		
ECC_{CCA} – Amostra2	28	26,803	27,73	0,89
ECC_{CCA} – Amostra3	28	27,827		

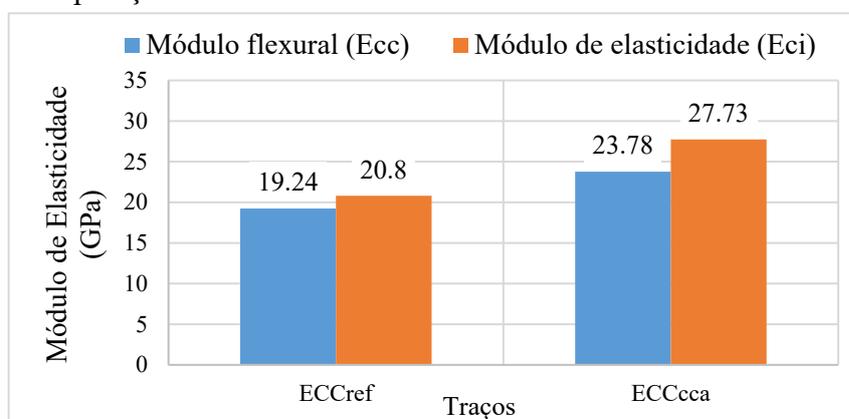
Tabela 17 – Módulo flexural - E_{cc} (GPa)

	24 horas	3 dias	7 dias	28 dias
ECC_{REF}	10,713	13,142	15,897	19,241
ECC_{CCA}	14,231	15,811	20,208	23,779

De acordo com a Tabela 16, conforme esperado, o traço ECC_{CCA} é caracterizado por um valor de módulo de elasticidade maior que o ECC_{REF}, com um aumento de rigidez de cerca de 33%. Conforme anteriormente apresentado, o ECC_{CCA} também foi associado à uma resistência à compressão, na idade de 28, dias superior ao do ECC_{REF}. Justificando os dados experimentais encontrados, Neville (2016) cita que quando uma amostra apresenta maior resistência à compressão que outro, essa também terá maior módulo. Ainda, de acordo com V. Li (2020), o módulo de elasticidade dos traços ECC_{REF} e o ECC_{CCA} classificam esse materiais entre típicos para aplicação em obras estruturais, os quais são associados a valores que variam entre 15GPa e 23GPa, e de alto desempenho, relacionados a módulos entre 41 e 48GPa.

Avaliando os módulos flexurais, apresentados na Tabela 17, observa-se que, tanto para o ECC_{REF} quanto para o ECC_{CCA}, ocorre um aumento de rigidez da matriz cimentícia com o avanço da idade analisada. Neville (2016) descreve que o módulo de elasticidade determinado através do ensaio de tração na flexão deve ser próximo ao módulo obtido através do ensaio à compressão. Dessa forma, a Figura 76 apresenta uma comparação entre os resultados médios de módulo de elasticidade, considerando a idade de 28 dias, exibidos nas Tabelas 16 e 17. Observa-se através da figura que o traço ECC_{REF} exibe valores médios de módulo próximos, sendo a diferença entre eles de cerca de 1,5GPa (8%). Analisando o ECC_{CCA}, verifica-se uma diferença maior entre os resultados médios obtidos através dos dois métodos, sendo essa de 3,95GPa (17%). Entretanto, esses valores ainda podem ser considerados próximos, sendo divergentes devido a variabilidade experimental e à aplicação de metodologias diferentes para obtenção dos dados.

Figura 76 – Comparação entre os resultados de módulo de elasticidade na idade de 28 dias



Fonte: Autora

Por fim, analisando a aplicação do ECC como pavimento de tabuleiros metálicos com base nos resultados apresentados na Tabela 16, quando comparado o módulo de elasticidade do

revestimento em ECC_{REF} (20,8GPa) ou ECC_{CCA} (27,73GPa) com o módulo de elasticidade da base em aço (210 GPa), verifica-se a grande diferença de rigidez entre os materiais. Como a base dessa estrutura apresenta uma rigidez muito maior, com a passagem dos veículos espera-se que o ECC esteja submetido a esforços de compressão, diferente de um pavimento convencional sobre um subleito de módulo baixo.

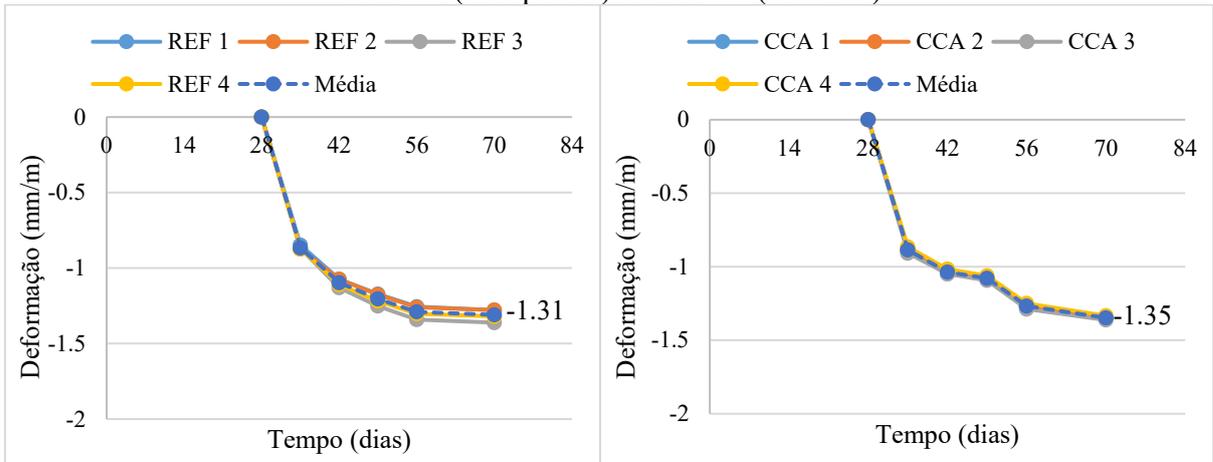
4.3.4. Retração

As Figuras 77, 78 e 79 apresentam os gráficos de deformação por retração livre e por secagem ao longo do tempo obtidos para os traços ECC_{REF} e ECC_{CCA} . De forma complementar, o Apêndice A apresenta os dados das leituras de massa para cada uma das idades avaliadas nestes ensaios, os quais exibem o mesmo comportamento das deformações de retração calculadas.

A Figura 77 exibe as deformações de amostras de dimensões 2,5x2,5x28,5cm após um período de 28 dias de estabilização em imersão em água com cal. Para estes gráficos, foram considerados os dados calculados para a retração por secagem para 28, 32, 35,42, 49, 56 e 70 dias, período em que os CPs foram mantidos em ambiente de temperatura ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade ($50 \pm 4\%$) controlada. Caetano (2019) descreve que, considerando esta metodologia de ensaio, as manifestações inerentes aos fenômenos de retração autógena e a alteração dimensional devido ao calor de hidratação do concreto, os quais são intensos nas primeiras idades, ocorrem durante o tempo de imersão. Após esse período, a perda de água para o ambiente pode ser associada majoritariamente à retração por secagem, consideração realizada neste estudo.

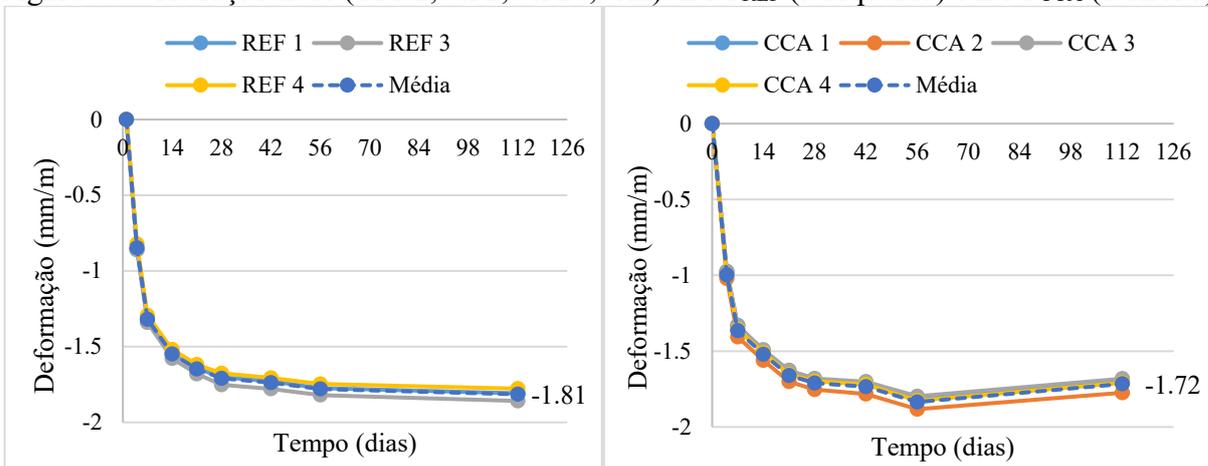
As Figuras 78 e 79, as quais diferenciam-se entre si pelas dimensões da seção das vigas de 2,5x2,5cm e 7,5 x7,5cm, nesta ordem, não consideram o processo de cura inicial em imersão, sendo esta realizada em ambiente com temperatura ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) e umidade ($50 \pm 4\%$) controladas. Desta forma, esses gráficos demonstram o somatório das distintas possibilidades de retração do concreto e variações volumétricas associadas, sem diferenciá-las entre si, sendo denominada como retração livre. De modo comparativo, na Figura 79 foram acrescentados os dados médios de retração livre de corpos de prova de 7,5x7,5x28,5cm obtidos por Costa (2015) no traço referência sem adição de CCA, distinguindo-se do ECC_{REF} estudado nesta dissertação pelo percentual de aditivo superplastificante e pela não utilização aditivo acelerador de cura.

Figura 77 – Retração (CPs 2,5 x 2,5x 28,5cm) com cura em imersão durante 28 dias: ECC_{REF} (à esquerda) e ECC_{CCA} (à direita)



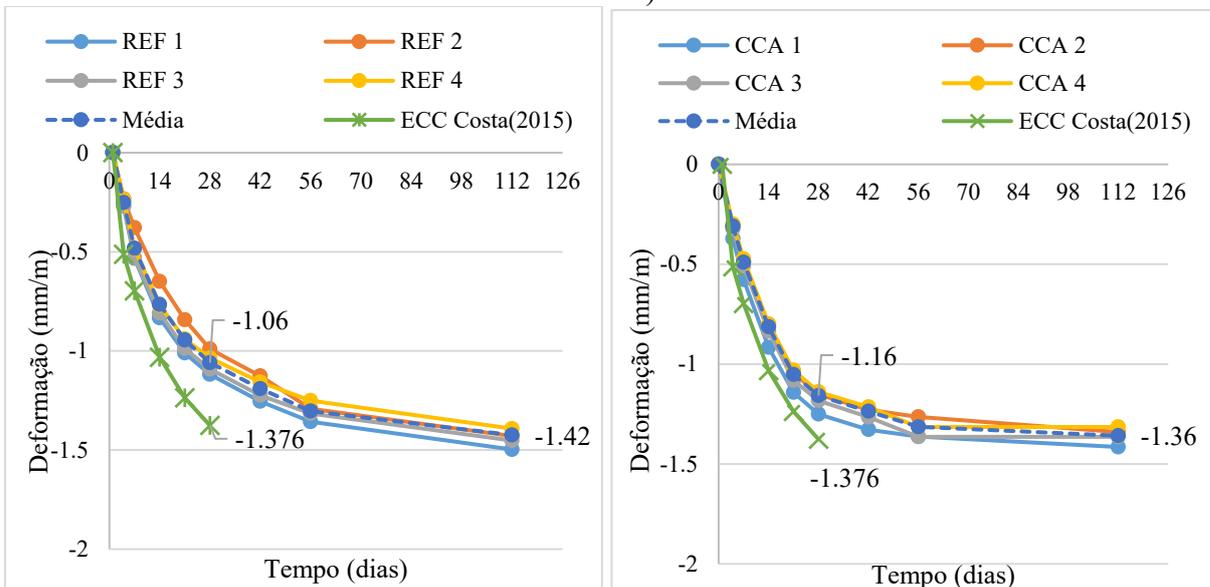
Fonte: Autora

Figura 78 – Retração livre (CPs 2,5 x 2,5 x 28,5cm): ECC_{REF} (à esquerda) e ECC_{CCA} (à direita)



Fonte: Autora

Figura 79 – Retração livre (CPs 7,5 x 7,5 x 28,5cm): ECC_{REF} (à esquerda) e ECC_{CCA} (à direita)



Fonte: Autora

Avaliando os resultados obtidos, observa-se que os valores de deformação por retração obtidos neste estudo, seja livre (CPs 2,5 x 2,5 x 28,5cm e 7,5 x 7,5 x 28,5cm) ou por secagem (CPs 2,5 x 2,5 x 28,5cm), não apresentaram diferenças significativas entre o ECC_{REF} e o ECC_{CCA}, sendo em todos os casos inferiores à 0,10 mm/m. Dessa forma, a substituição parcial em massa do cimento por 20% de cinza de casca de arroz no traço referência não exibiu as reações esperadas que podem provocar uma considerável diminuição da retração. O percentual de incorporação de CCA na dosagem do concreto e o acréscimo de aditivo acelerador de cura junto ao aditivo superplastificante podem ter influenciado esses resultados, visto que não foram estudados os diferentes teores de incorporação de cinza combinados com as várias possibilidades de arranjos e percentuais de aditivos. Também não foi avaliada a pozzolanicidade da cinza de casca de arroz incorporada ao ECC, sendo essa propriedade importante para analisar a reatividade deste material.

Para as amostras de dimensões menores, exibidas nos gráficos das Figura 77 e 78, tanto nos resultados referentes à retração por secagem quanto livre, ocorre uma estabilização nas leituras de deformação com cerca de 56 dias de idade, com pequenas variações nos valores após este período. Tal fato ocorre, especialmente, para o ECC_{CCA} devido à reatividade tardia da cinza de casca de arroz. De maneira semelhante, espera-se uma estabilização da retração livre dos corpos de prova de maiores dimensões, apresentados na Figura 79, após 112 de idade, pois, nesta situação, a perda de água para o ambiente ocorre de forma mais lenta, sendo a retração uma função da relação volume/superfície dos elementos.

O efeito da variação das dimensões dos corpos de prova nos resultados de deformações por retração livre pode ser observado através da comparação entre as Figuras 78 e 79. Levando em consideração o mesmo tempo de cura, tanto do ECC_{CCA} quanto do ECC_{REF}, verifica-se uma redução nos valores médios com o aumento da seção das bases das amostras prismáticas. Com 112 dias de idade, os CPs de 2,5x2,5x28,5cm apresentam retrações de 1,81mm/m para o ECC_{REF} e 1,72mm/m para o ECC_{CCA}, enquanto os CPs de 7,5x7,5x28,5cm exibem deformações de 1,42mm/m e 1,36mm/m, respectivamente. Esse resultado é considerado esperado, pois a retração é dependente da forma e da dimensão dos elementos de concreto, decorrendo de forma diferencial, mais lenta e inferior para peças maiores (NEVILLE, 2016). O uso de moldes menores também pode provocar uma tendência a orientação das fibras de forma paralela durante a moldagem, fator que pode influenciar os resultados, sendo a eficiência das fibras para controle da retração dependente da aleatoriedade de sua orientação.

Contrapondo os resultados da evolução das deformações de retração em amostras de mesmas dimensões (2,5 x 2,5 x 28,5cm) e metodologias de cura diferentes, exibidos nos gráficos das Figuras 77 e 78, percebe-se que os corpos de prova que avaliaram a retração livre, independentemente do traço, exibiram valores médios superiores aos de retração por secagem, conforme o esperado. Nos gráficos, é possível perceber uma perda maior de água nas primeiras idades para as amostras de retração livre, as quais exibem linhas representativas com um ângulo de inclinação superior aos CPs associados à retração por secagem. Como anteriormente descrito, a retração livre representa um conjunto de diversos tipos de deformações de retração que ocorrem no concreto, incluindo os valores do fenômeno decorrente da secagem.

Nos gráficos da Figura 79 são comparados os resultados encontrados neste estudo para a retração livre, considerando amostras de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5cm, com os descritos por Costa (2015) para o seu traço de ECC referência. Avaliando a idade de 28 dias, nota-se uma melhoria dos resultados médios de deformação, sendo as retrações do ECC_{REF} e a do ECC_{CCA} cerca de 23% e 16% menores, respectivamente, que a relatada por Costa (2015) para a mesma idade. Essa resposta satisfatória pode ser associada à redução da quantidade de aditivo superplastificante do traço original com o objetivo de não promover a segregação do concreto, proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas dos traços.

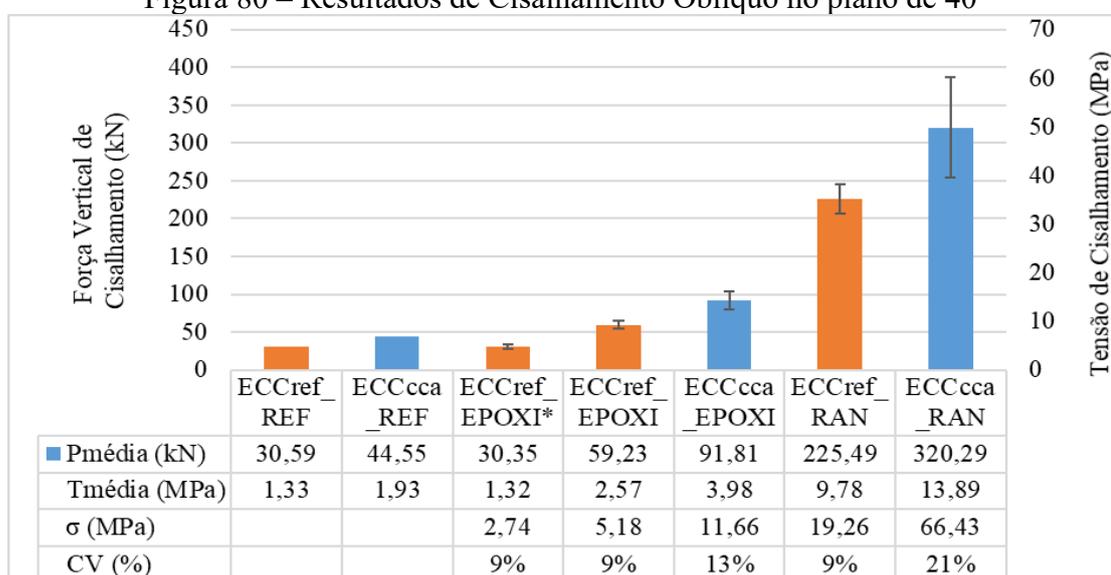
Por fim, ressalta-se que os quatro corpos de prova das 6 combinações avaliadas não exibiram grandes variações de resultados entre si. Assim, constata-se que o processo de moldagem e cura em ambiente controlado foi considerado homogêneo e satisfatório levando em conta a variabilidade experimental.

4.4. Etapa 3: Cisalhamento Obliquo

A aderência entre o ECC e o aço foi avaliada através do ensaio de cisalhamento oblíquo, utilizando uma adaptação da metodologia de Ma *et al.* (2018). A Figura 80 apresenta o gráfico que relaciona os tipos de aderência considerados e os valores médios da força vertical (kN) e a tensão de cisalhamento no plano inclinado de 40° para os traços ECC_{REF} e ECC_{CCA} . No gráfico, as colunas em laranja são referentes ao traço ECC_{CCA} , enquanto as azuis são referentes ao ECC_{REF} . Junto ao gráfico também são apresentados os dados médios de força vertical ($P_{média}$), tensão de cisalhamento no plano de 40° ($T_{média}$), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) de cada uma das combinações de traço e tipo de aderência avaliadas.

Com relação à nomenclatura adotada, ECCref_REF e ECCcca_REF representam os valores médios das amostras sem qualquer material adesivo para promover aderência entre o ECC e o aço, ECCref_EPOXI e ECCcca_EPOXI as que propuseram a adesão entre os materiais por meio de resina epóxi e ECCref_RAN e ECCcca_RAN as que consideraram ranhuras no aço, além da aplicação de epóxi. Ainda, a título de comparação, foi incorporado ao gráfico a média de 2 corpos de prova em que, diferente dos demais analisado, não foi realizada preparação da superfície metálica antes da aplicação do epóxi e do composto cimentício, valor denominado como ECCref_EPOXI*.

Figura 80 – Resultados de Cisalhamento Oblíquo no plano de 40°



Fonte: Autora

Verifica-se que, para todos os procedimentos de aderência avaliados, o traço ECC_{CCA} exibiu uma maior resistência ao desprendimento ao aço que o ECC_{REF}, exibindo maiores forças verticais e tensões de cisalhamento oblíquo no plano de 40°. Em termos percentuais, o acréscimo médio de resistência do ECC_{CCA} em relação ao ECC_{REF} foi aproximadamente 45,6% para a estratégia referência, 55% para a aplicação de resina epóxi e 42% para a utilização de epóxi aliada combinado à superfície metálica ranhurada. Esse resultado corrobora com as respostas encontradas para os ensaios de resistência à compressão simples e à tração na flexão, os quais também relacionam melhores resultados ao ECC_{CCA}. Da mesma forma, entende-se com esses resultados e com a experiência na moldagem dos corpos de prova que, o traço ECC_{CCA} demonstrou uma rugosidade superficial maior da matriz cimentícia que o ECC_{REF}, a qual permite uma melhor adesão do material com o aço e melhor interação com a resina epóxi.

Conforme o esperado, a metodologia que não considerou o uso de material adesivo para promover aderência entre o aço e o ECC, descrita como referência, obteve os menores valores de resistência ao cisalhamento oblíquo. A adição de epóxi entre os materiais provocou melhoria na adesão entre esses, sendo os resultados médios encontrados cerca de 93% e 106% maiores para ECCref_EPOXI e o ECCcca_REF, respectivamente, quando comparados à metodologia referência, representada por ECCref_REF e ECCcca_REF. Destaca-se que nesta dissertação foi avaliada apenas uma dosagem de epóxi, sendo necessário o estudo mais aprofundado desta proporção em trabalhos futuros, podendo mudar consideravelmente os resultados. MA *et al.* (2018) descrevem que, quando a resina é utilizada na dosagem ideal, ela forma uma camada de ligação estrutural na superfície da placa de aço fornecendo uma ligação eficaz entre os materiais.

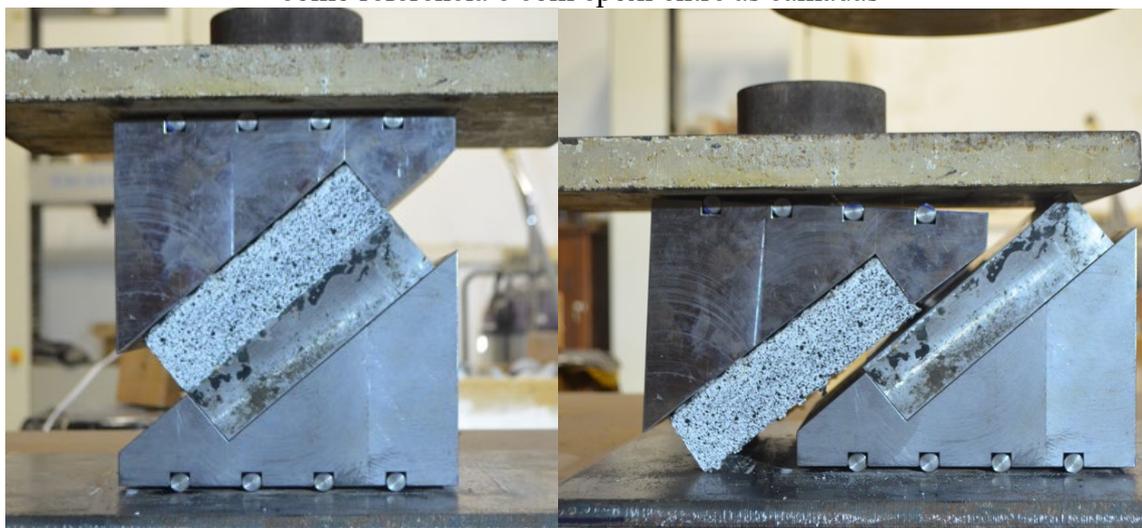
Considerando o reaproveitamento das placas de aço e avaliando a preparação da superfície metálica para a aplicação do epóxi e ECC, observa-se que o preparo da face metálica influenciou os valores de resistência ao cisalhamento oblíquo. Comparando as respostas do ECC_EPÓXI com o ECC_EPÓXI*, verifica-se um aumento de 95% na resistência quando a superfície do aço foi lixada e limpa com álcool isopropílico, aumentando a efetividade da camada de aderência. Quando esse processo não foi realizado, o uso de resina epóxi não se mostrou eficiente, fato que pode ser avaliado comparando os resultados ECCref_REF e ECCref_EPOXI*, os quais apresentam valores de tensão de cisalhamento oblíquo de 1,33 MPa e 1,32 MPa, sendo esses considerados equivalentes.

Os maiores valores de resistência ao cisalhamento, independente do traço avaliado, foram obtidos através da metodologia de aderência que considera a combinação de ranhuras na superfície metálica e aplicação de epóxi. Esses resultados podem ser considerados esperados, visto que maiores rugosidades superficiais promovem uma melhor adesão entre materiais de diferentes naturezas. Relacionando os resultados obtidos para o ECCcca_RAN com ECCcca_Epóxi, obteve-se um aumento de quase 350% na tensão de cisalhamento oblíqua. De forma semelhante, comparando o ECCref_RAN com o Eref_EPOXI obteve um aumento de cerca de 380%.

O comportamento de ruptura entre o ECC e o aço pode ser observado através das sequências de imagens apresentadas nas Figuras 81 e 82. Com relação à avaliação visual frente à ruptura dos materiais, as amostras de ECC_{REF} e ECC_{CCA} exibiram o mesmo comportamento de ruptura, frágil ou não, para a mesma estratégia para promover aderência avaliada. As amostras descritas

como referência (ECCref_REF e ECCcca_REF) e as que consideram o uso de resina epóxi (ECCref_EPOXI, ECCref_EPOXI* e ECCcca_EPOXI) exibiram uma ruptura frágil, com desprendimento total entre os materiais ao atingir o carregamento máximo. Esse comportamento pode ser visualizado através da Figura 81.

Figura 81 – Cisalhamento Obliquo: Comportamento de ruptura frágil das amostras descritas como referência e com epóxi entre as camadas



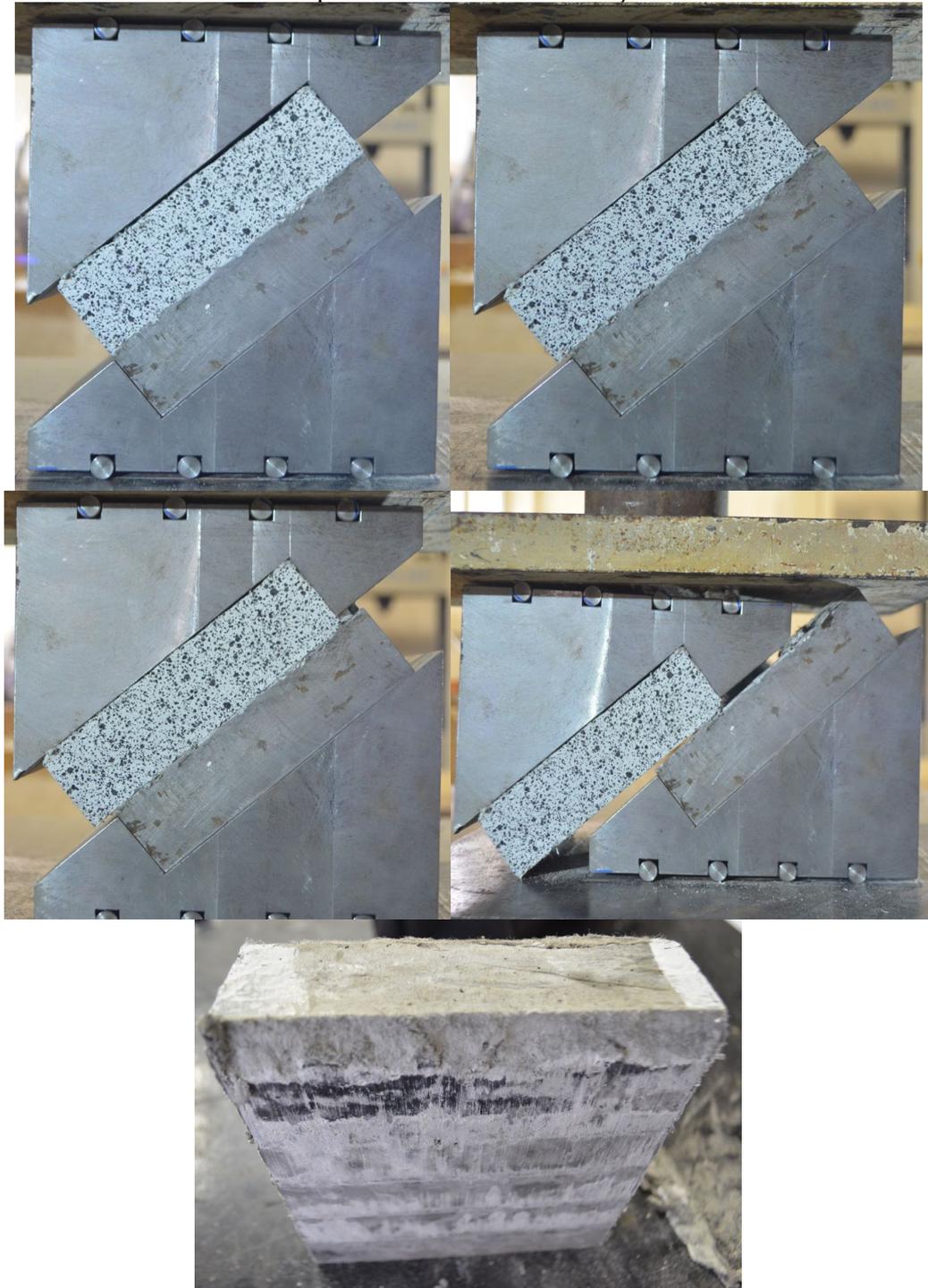
Fonte: Autora

Para a metodologia com ranhuras e aplicação de epóxi (ECCref_RAN e ECCcca_RAN), representada na Figura 82, a ruptura ocorreu primeiramente na zona de contato entre o aparato elaborado para o ensaio e o ECC, não ocorrendo separação total entre o ECC e o aço. Após essa ruptura inicial, foi possível iniciar um novo ciclo de carregamento até o desprendimento total dos materiais em que, na maioria das vezes, não se atingiu uma força maior que a referente à ruptura na zona de contato. Observa-se na Figura 82 que o descolamento entre o aço e o ECC ocorreu de forma lenta no segundo ciclo de carregamento, demonstrando uma resistência muito maior ao cisalhamento que as demais estratégias avaliadas. Esse resultado, em conjunto com os valores médios obtido para a tensão de cisalhamento oblíquo no plano de 40° , corrobora com a conclusão de que, independentemente do traço, este método apresenta a maior eficiência frente ao cisalhamento dentre os demais avaliadas neste estudo.

De forma complementar as imagens exibidas nas Figuras 81 e 82, foram elaborados os gráficos das Figura 83 e Figura 84. Estes descrevem a trajetória de ruptura frente ao cisalhamento no plano de 40° de uma amostra representativa de cada combinação avaliada, exceto para as estratégias descritas como referência e para o ECCref_EPOXI*. Optou-se pela avaliação de apenas uma amostra de cada arranjo devido a variabilidade experimental durante a realização

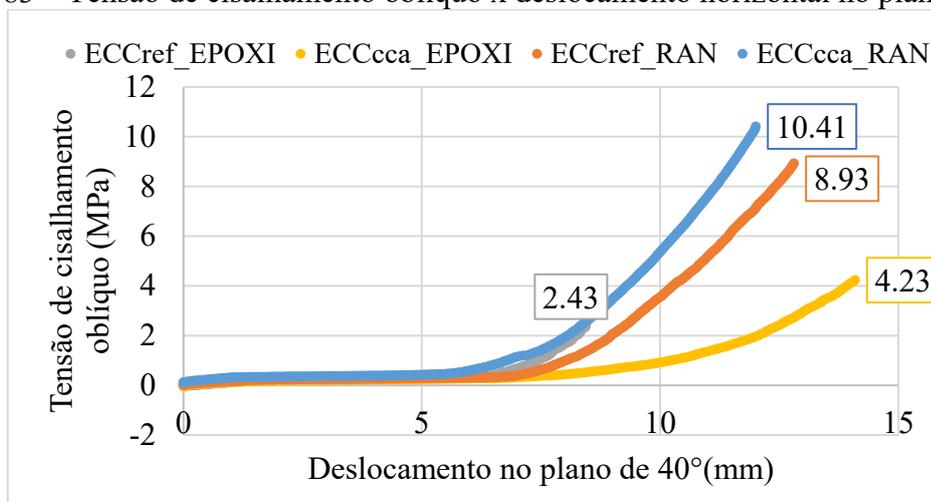
deste ensaio, a qual obteve coeficientes de variação entre 9% e 21%. Na Figura 83 são relacionadas as deformações no plano de 40° (mm) obtidos no software GOM Correlate com a tensão de cisalhamento (MPa) calculadas para o plano de 40°. De forma comparativa, a Figura 84 exibe o comportamento da tensão calculada no plano de 40° (Mpa) de cada amostra ao longo do tempo (s), dados obtidos através do software da prensa.

Figura 82 – Cisalhamento Oblíquo: Comportamento das amostras que consideraram ranhuras+epóxi na interface entre o aço e o ECC



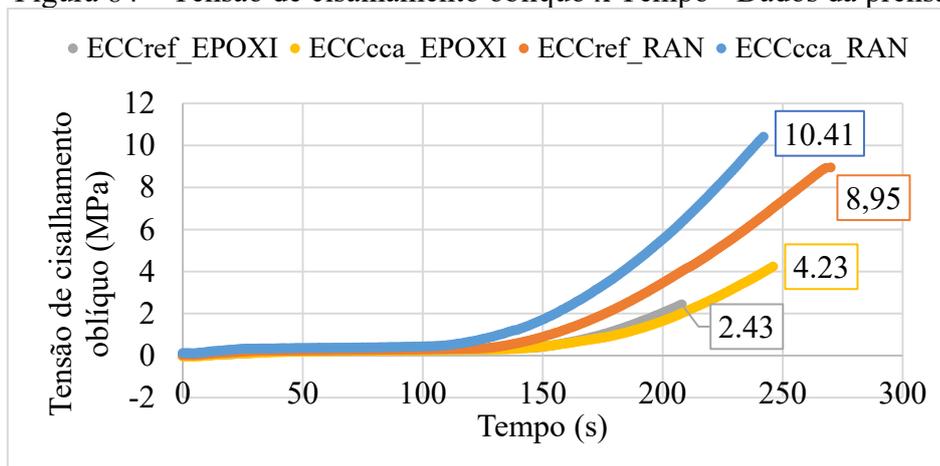
Fonte: Autora

Figura 83 – Tensão de cisalhamento oblíquo x deslocamento horizontal no plano de 40°



Fonte: Autora.

Figura 84 – Tensão de cisalhamento oblíquo x Tempo - Dados da prensa



Fonte: Autora.

Em ambos os gráficos, as curvas das amostras, tanto ECC_{REF} quanto ECC_{CCA}, exibiram a mesma trajetória de ruptura. Considerando a Figura 83, observa-se que as amostras que consideram ranhuras na superfície metálica combinadas à aplicação de epóxi, descritas como ECC_{ref_RAN} e ECC_{cca_RAN}, demonstraram maior rigidez que as amostras com apenas epóxi entre os materiais, ECC_{ref_EPOXI} e ECC_{cca_EPOXI}, com trajetórias de ruptura de maior inclinação associadas à maiores resultados de tensão de cisalhamento oblíquo. As amostras ECC_{ref_EPOXI} e ECC_{cca_EPOXI} exibiram o menor e o maior deslocamento no plano de 40°, respectivamente, demonstrando trajetórias de ruptura mais alongadas e menores tensões de cisalhamento oblíquo.

4.5. Etapa 4: Modelos Experimentais

Nos itens seguintes serão avaliados os resultados dos modelos experimentais moldados com os ECC_{REF} e ECC_{CCA}, os quais consideraram a aplicação de resina epóxi para promover aderência entre o aço e o ECC. Serão apresentados e discutidos os resultados de suas condições superficiais, das deformações sofridas ao longo do tempo devido à retração, a qual é restringida apenas na base, e da aderência entre as camadas de aço e ECC, tendo em vista a sua aplicabilidade como pavimento de tabuleiros metálicos, especialmente para obras de infraestrutura viária.

4.5.1. Avaliação visual dos modelos

A avaliação inicial dos modelos experimentais foi realizada de forma empírica e visual, sendo considerados apenas os protótipos que se mantiveram aderidos durante o período de acompanhamento de 28 dias, ou seja, os modelos 1 e 3. Conforme mostra a Figura 85, o revestimento de ECC_{REF} demonstrou aparentemente um melhor acabamento superficial que o ECC_{CCA}, com menor rugosidade. Uma das justificativas para este fato é o índice de consistência dos traços, sendo o valor médio encontrado para o ECC_{CCA} de 21,33cm menor que o índice médio do ECC_{REF} de 22,7cm, o que confirma a maior dificuldade de execução do acabamento superficial desse tipo de pavimento.

Figura 85 – Acabamento superficial do ECC_{REF} (à esquerda) e ECC_{CCA} (à direita)



Fonte: Autora

Em ambos os modelos, não foram constatadas exsudação da nata de concreto, fissuras de retração, problemas de cura ou outras manifestações patológicas durante o período de análise. Ainda, para os modelos 1 e 3, o aço e o ECC demonstraram estar visualmente aderidos durante todo o processo e não ocorreu a perda das leituras dos *strain gages* fixados na placa metálica.

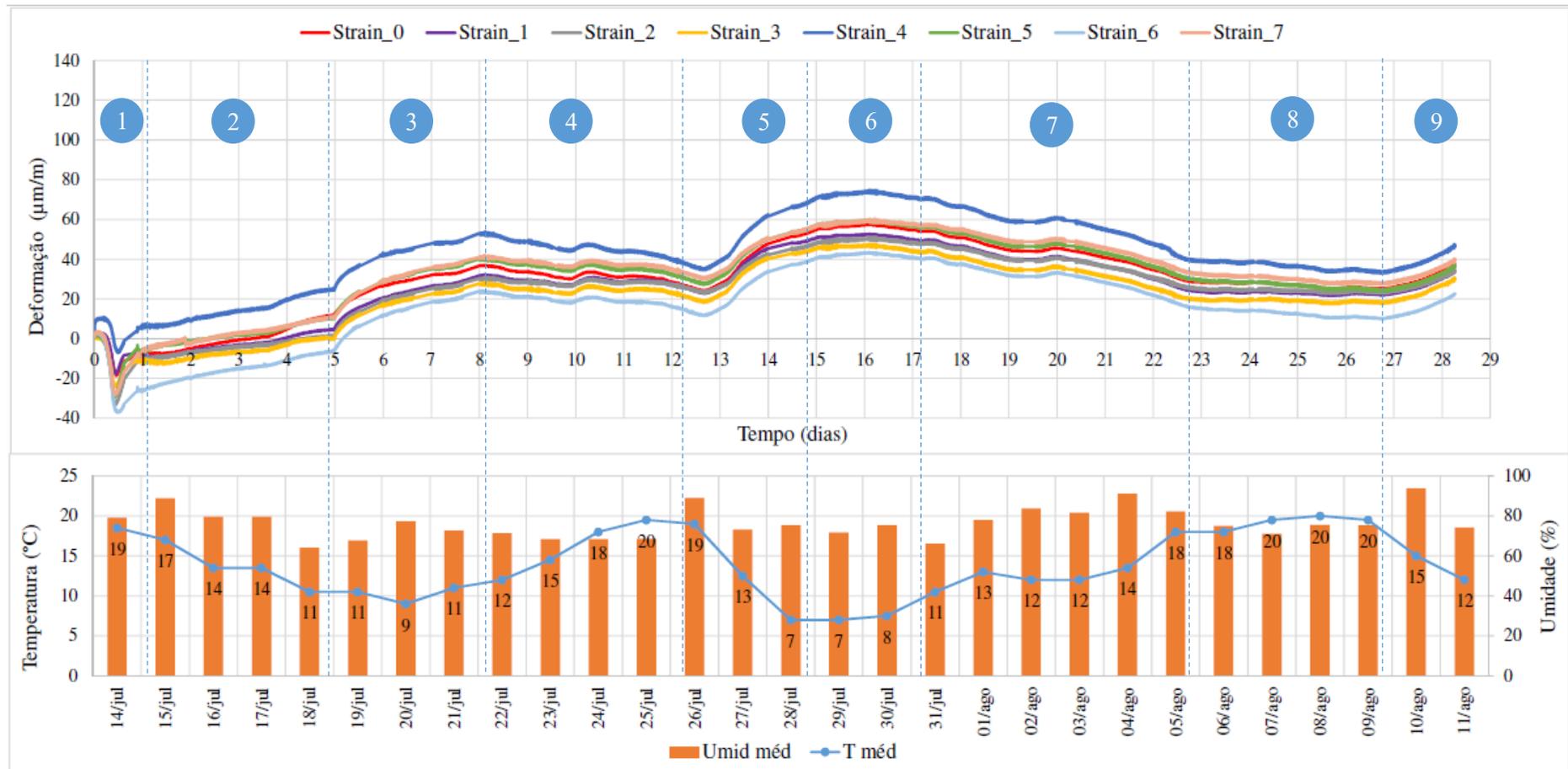
4.5.2. Análise das deformações por retração restringida na base e aderência dos modelos

Os gráficos representados nas Figuras 86 e 87 apresentam os dados obtidos através da instrumentação dos modelos 1 e 3, os quais tiveram as deformações decorrentes da retração, restringida apenas na base devido a resina epóxi, coletadas durante, no mínimo, 28 dias. Por ter ocorrido a perda da aderência entre o aço e o ECC, os dados do segundo modelo não serão discutidos. Para cada gráfico, além da curva de evolução das deformações, abaixo do respectivo dia de coleta, foram relacionadas as temperaturas e umidades médias referentes à mesma data da leitura, sendo estes dados retirados da base do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (IMPE) para Porto Alegre-RS. Ainda, para explicar o comportamento das deformações devido as variações de umidade e temperatura entre os dias analisados, os gráficos foram divididos em trechos com desempenhos semelhantes, delimitados por linhas tracejadas e denominados de 1 até 9 para o ECC_{REF} e 1 até 7 para o ECC_{CCA}.

O primeiro modelo (Figura 86) foi moldado em 14/07/21 e, em seguida, iniciou a coleta dos dados considerando essa data como zero, finalizando as leituras em 11/09/21, data associada a 28,268 dias. O terceiro protótipo (Figura 87) foi moldado em 28/09/21 e começou a captura dos dados cerca de 2 meses e meio após o primeiro, data considerado como zero, concluindo a captura das deformações em 27/10/21, data relacionada a 28,76 dias. Salienta-se que não foram realizados controle de umidade e temperatura, sendo as respostas coletadas associadas a uma condição real em campo com ruídos experimentais.

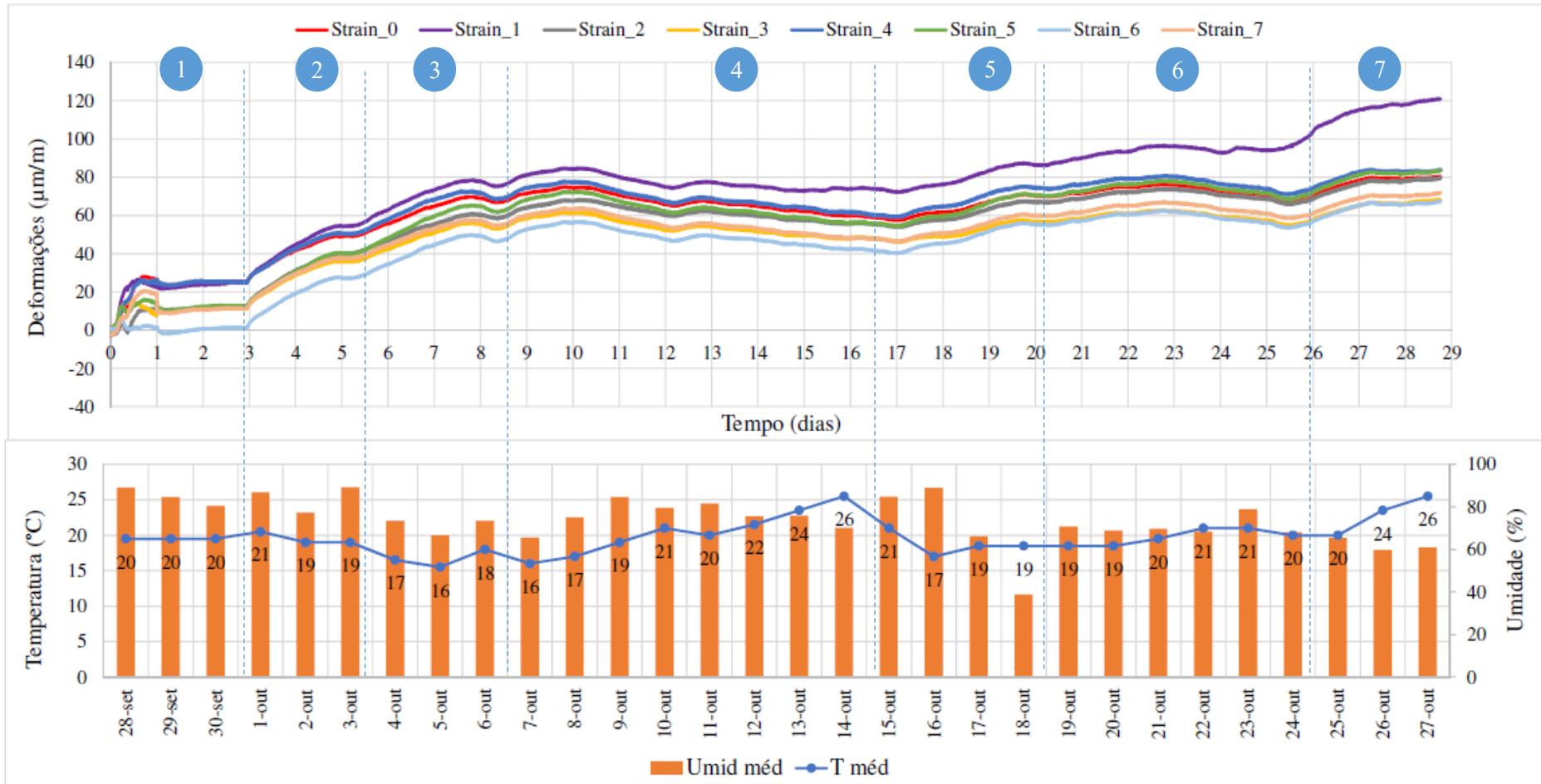
Para ambos os modelos (1 e 3), observa-se que a maior parte das deformações se encontram no eixo positivo, convencionalmente relacionado aos esforços de tração. Porém, para este caso, ocorrem momentos contrários, sendo assim, a convenção de sinais referente as deformações do composto cimentício é contrária, sendo a tração associada ao eixo negativo e a compressão ao positivo. Essa inversão ocorre, pois os *strain gages* foram colados na parte inferior do aço, conforme mostra a Figura 50, e, por associação da análise, os protótipos foram considerados como estruturas mistas aço/concreto. Dessa forma, considerando um diagrama de tensões convencional para lajes ou vigas, na parte superior composta de ECC, ocorrem deformações majoritariamente de compressão, enquanto na parte inferior composta em aço decorrem esforços de tração. Porém, é importante salientar que, por terem o comportamento associado a estruturas mistas, os valores encontrados através das leituras dos *strain gages* na superfície metálica dos modelos são deformações representativas do material cimentício.

Figura 86 – Gráfico de deformação por retração restringida na base ($\mu\text{m}/\text{m}$) ao longo do tempo (dias) relacionado à temperatura e umidade na respectiva data de leitura dos dados do ECC_{REF}



Fonte: Autora.

Figura 87 – Gráfico de deformação por retração restringida na base ($\mu\text{m}/\text{m}$) ao longo do tempo (dias) relacionado à temperatura e umidade na respectiva data de leitura dos dados do ECC_{CCA} (Modelo 3)



Fonte: Autora.

Na Figura 86, referente ao protótipo com ECC_{REF} , vê-se nas primeiras 24 horas, representadas através do segmento 1, dois esforços contrários no material cimentício. Nas 12 horas iniciais, verifica-se uma pequena expansão do ECC_{REF} para todos os pontos de coleta de dados, gerando esforços de tração. Essa pode ser relacionada ao calor liberado devido as reações de hidratação do concreto. Segundo Neville (2016), nessa fase ocorre um aumento líquido de volume e de massa do concreto devido a absorção da água pelo gel de cimento, resultando em uma pressão de expansão. De forma semelhante, Costa (2015) observou o mesmo comportamento para o ECC referência submetido ao ensaio de retração restringida através do anel. Ainda, nas 12 horas posteriores de avaliação das deformações do modelo, percebe-se que surgem novas reações de compressão, processo que segue essa tendência ao longo de todo o período de leituras.

No trecho 2, referente ao 1° até o 5° dia, ocorreu um aumento lento das deformações de compressão à medida que a temperatura e a umidade média decresciam ao longo dos dias. Nesse período o modelo permaneceu coberto com lona plástica, fato que colaborou com esse resultado, demonstrando pouca interferência das variáveis ambientais. No 5° dia a cobertura foi retirada, ocorrendo um aumento mais acelerado das deformações até o 8° dia, mesmo com as condições ambientais consideradas estáveis (trecho 3).

Avaliando os demais segmentos do modelo de ECC_{REF} , observa-se que quando a umidade média se manteve praticamente constante com aumento da temperatura média, deu-se uma pequena queda dos valores de deformação por compressão. Esse comportamento é associado aos trechos 4, referente ao 8° ao 12° dia, e ao 7, representante do 17° ao 22° dia de análise. Quando as condições ambientais mantiveram certa estabilidade, como nos segmentos 6 (15° ao 17° dia) e 8 (23° ao 27° dia), os valores de retração permaneceram aproximadamente constantes. Por fim, com a queda da temperatura média e da umidade ocorreram aumentos nos esforços de compressão, como no 12° ao 15° dia e no 27° ao 28° dia, representados pelos segmentos 5 e 9, respectivamente.

Avaliando o protótipo com pavimento de ECC_{CCA} , representado na Figura 87, de modo geral, verifica-se que quase todos os pontos de leitura mantiveram as curvas características de deformação por retração, sendo aproximadamente paralelas entre si. Contrário a este comportamento proporcional, observa-se que o Strain_0 começa a apresentar maiores deformações a partir do trecho 4, afastando-se progressivamente das curvas dos demais extensômetros e resultando, ao final do experimento, uma deformação cerca de 79,6% maior que Strain_6, referência de menor valor. Pelo fato do Strain_0 não se encontrar fixo nas

extremidades das placas, esse comportamento é divergente ao esperado, porém possível em modelos experimentais onde não existem controle das reações que ocorrem no concreto e das variações ambientais.

Neste modelo não foi possível observar a mesma expansão inicial que ocorreu no protótipo com ECC_{REF} . As reações de hidratação dos concretos com a incorporação de materiais cimentícios suplementares com propriedades pozolânicas são mais lentas comparadas ao concreto convencional. Ainda, neste caso, o ECC_{CCA} também foi coberto com lona plástica para auxiliar na cura, atrasando ainda mais as reações provocadas pela retração. Verifica-se no início das leituras, referentes ao segmento 1, o crescimento das deformações de retração devido aos esforços de compressão. Após esse período, ocorre uma leve queda dos valores e posterior comportamento quase linear até o 3º dia. Neste ponto é retirada a cobertura plástica, aumentando assim a perda da água do concreto para o ambiente e, conseqüentemente, as deformações de compressão causadas pela retração por secagem. Esse aumento é representado através dos segmentos 2 e 3, onde são praticamente mantidas as temperaturas médias diárias e as umidades apresentam pequenas divergências.

Avaliando o comportamento dos *strain gages* nos demais segmentos representados na Figura 87, verifica-se no 4º intervalo que um aumento de cerca de 1°C das temperaturas médias diárias, combinado à uma certa estabilização da umidade, provocou uma queda suave nos valores de deformação em todos os pontos de leitura. De forma inversa, no trecho 5 ocorreu uma queda acentuada da umidade diária com estabilização das temperaturas, resultando em aumento dos esforços de compressão. No 6º segmento as condições ambientais se mantiveram aproximadamente constantes, ocasionando uma regularidade nos valores de retração. Por fim, no trecho 7 ocorreu uma diminuição da umidade e aumento brusco da temperatura, provocando um acréscimo mais acentuado nos valores de deformação por retração obtidos por todos extensômetros acompanhados.

De forma geral, o ECC_{CCA} demonstrou uma maior retração que o ECC_{REF} , com uma deformação média aos 28 dias de 82 $\mu\text{m}/\text{m}$, sendo cerca de 2,4 vezes maior que o valor médio, para a mesma idade, exibido pelo ECC_{REF} , que foi de 34,7 $\mu\text{m}/\text{m}$. Entretanto, a magnitudes das deformações de retração observadas para os revestimentos não podem ser comparadas entre si, pois não foram mantidas as mesmas condições ambientais, sendo as reações dos materiais totalmente diferentes. O período de análise do modelo com ECC_{REF} apresentou uma temperatura média de 14°C e umidade média de 76%, enquanto o modelo com ECC_{CCA} exibiu variações médias de

20°C e 74%. Como observado, as condições ambientais influenciaram diretamente nas respostas de ambos os modelos, sendo temperaturas médias maiores combinadas com menores umidades responsáveis por um aumento dos esforços de compressão devido à retração. Salienta-se que não foram avaliadas as oscilações ambientais diárias, as quais são consideráveis no local geográfico onde os modelos foram construídos. Ainda, da mesma forma que as condições ambientais influenciaram os resultados coletados, os compostos cimentícios também liberaram calor durante as reações de hidratação no processo de cura, provocando variações nas deformações que, na maior parte dos casos, não puderam ser separadas do valor global.

Considerando os modelos avaliados nas Figuras 86 e 87, a aderência entre o aço e o ECC foi satisfatória, não exibindo perdas de leituras dos *strain gages* para nenhum ponto, concluindo-se assim que os materiais se mantiveram unidos durante todo o experimento. Dessa forma, valida-se o uso de epóxi para promover adesão entre a superfície metálica e os compostos cimentícios reforçados com fibras. Porém, observa-se que, conforme demonstrou o segundo modelo experimental e foi comentado no item 3.5, a preparação da superfície metálica é de extrema importância para que essa aderência seja efetiva. Por fim, salienta-se que nestes protótipos foi analisada a união entre camadas em uma situação estática, sem a aplicação de esforços cisalhantes proveniente dos veículos, devendo essa ser estudada em trabalhos futuros.

4.5.3. Avaliação da Macrotextura e Microtextura

A análise da condição superficial de um pavimento pode ser realizada através de sua microtextura e macrotextura, as quais afetam diretamente a aderência pneu/pavimento e, conseqüentemente, a segurança viária. Os resultados da macrotextura, obtida através do ensaio de altura da mancha de areia (HS), e da microtextura, avaliada no ensaio pêndulo britânico (VRD), referentes aos modelos experimentais são apresentados na Tabela 18 e Tabela 19. Destaca-se que só foram avaliados os dados referentes aos modelos 1 e 3.

Analisando a macrotextura, apresentada na Tabela 18, segundo a especificação técnica ET-DE-P00/040 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP), recomenda-se a que a HS de um pavimento de concreto de cimento Portland esteja entre 0,6mm e 1,2mm, sendo classificada de média à grossa, para aceitação do revestimento em termos de segurança viária. Da mesma forma, o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, 2006) sugere os mesmos limites, porém para revestimentos asfálticos. Com base nestas duas

recomendações, ambos modelos experimentais apresentam uma macrotextura considerada média, sendo então adequadas em termos executivos.

Tabela 18 – Resultado da macrotextura

Ensaio	Altura média da mancha de areia (HS)	Classificação
ECC _{REF} – Amostra 1	0,60	Média
ECC _{REF} – Amostra 2	0,54	
ECC _{REF} – Amostra 3	0,55	
ECC _{REF} – Amostra 4	0,60	
Modelo 3: ECC _{20%CCA} – Amostra 1	0,73	Média
Modelo 3: ECC _{20%CCA} – Amostra 2	0,69	
Modelo 3: ECC _{20%CCA} – Amostra 3	0,93	
Modelo 3: ECC _{20%CCA} – Amostra 4	0,74	

Tabela 19 – Resultado do ensaio de microtextura

Traço	VRD	VRD Médio	Classificação
ECC _{REF} – Amostra 1	54,67	53,665	Medianamente rugosa
ECC _{REF} – Amostra 2	53,33		
Modelo 3: ECC _{20%CCA} – Amostra 1	42,33	40,500	Insuficientemente rugosa
Modelo 3: ECC _{20%CCA} – Amostra 2	38,67		

Segundo Corley-Lay (1998), a macrotextura está relacionada à rugosidade superficial do revestimento devido à acomodação das partículas do agregado. HOERNER *et al.* (2003) mencionam comprimentos de onda de 0,5 a 51mm e amplitudes verticais de 0,1 a 20mm. Como o ECC não apresenta partículas graúdas em sua composição, é esperado que esse material não exiba uma HS classificada como grosseira, como de fato ocorreu neste estudo.

Observa-se que não foram realizados cuidados adicionais para promover rugosidade superficial ao revestimento de ECC dos modelos experimentais, pois não existem normativas nacionais de aceitabilidade para o acabamento de pavimentos de concreto. Para melhoria dessa propriedade, HOERNER *et al.* (2003) mencionam que a macrotextura pode ser produzida através de pequenos canais de superfície, ranhuras ou entalhes intencionalmente formados no concreto em estado plástico ou endurecido, através de corte, para permitir que a água escape por baixo dos pneus do veículo. No Brasil, segundo Balbo (2009) a promoção de textura superficial é realizada através de ranhuras promovidas por vassoura específica ou, em menor caso, por meio da técnica *grooving*, a qual é realizada a texturização do revestimento de concreto fresco com equipamento característico.

Avaliando os resultados de microtextura, apresentada na Tabela 19, o modelo com ECC_{REF} foi classificado como medianamente rugoso e o com ECC_{CCA} como insuficientemente rugoso. Conforme a classificação do Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (2006), o valor de resistência à derrapagem dos pavimentos deve ser superior ou equivalente à 55. Considerando essa especificação, o revestimento do modelo experimental com ECC_{REF} apresenta valor próximo ao considerado aceitável, porém aumentar o valor do VRD é recomendável para proporcionar melhorias na aderência pneu/pavimento. Com relação ao pavimento com ECC_{CCA} , é necessário significativo aumento da microtextura promovida pelo traço para adequação ao uso. Para pavimentos asfálticos, essa melhoria é possível através da seleção de agregados (CORLEY-LAY, 1998).

HOERNER *et al.* (2003) mencionam que a microtextura é relacionada aos agregados finos presentes no concreto, com comprimentos de onda entre $1\mu\text{m}$ e $0,5\text{mm}$. O traço deste estudo considerou a incorporação de areia fina, a qual exibe diâmetro médio das partículas de $181,20\mu\text{m}$, sendo este dentro deste intervalo. Dessa forma, para que o VRD possa ser aumentado pode ser analisada um traço com a incorporação de uma areia com partículas de diâmetros médios maiores, no caso de aplicação como pavimento, considerando ainda as limitações impostas para manter o comportamento mecânico característico do ECC.

Comparando os modelos, o revestimento de ECC_{REF} demonstrou uma menor macrotextura que o ECC_{CCA} , porém exibiu melhores resultados de microtextura. Conforme citado anteriormente, o revestimento com ECC_{CCA} exibiu um acabamento superficial com rugosidade, característica que pode ter colaborado com os valores encontrados. Considerando os compósitos cimentícios reforçados com fibras de forma geral, a dispersão dessas também influencia nas respostas de microtextura e macrotextura, fator que não pode ser controlado. Ainda, para este caso, como os modelos experimentais não foram submetidos à ciclos de carregamento, não foi possível realizar o acompanhamento destas propriedades ao longo do tempo devido ao desgaste superficial.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são descritas as principais conclusões alcançadas durante a análise dos resultados experimentais, as quais respondem os objetivos inicialmente propostos. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros buscando sanar lacunas de conhecimento que não conseguiram ser abordadas nesta dissertação, especialmente devido ao tempo limitado de estudo.

5.1. CONCLUSÕES

A principal conclusão deste estudo, baseada no objetivo principal proposto no início dos trabalhos experimentais, é a comprovação da aplicabilidade do composto cimentício estudado como pavimento sobre tabuleiros metálicos. Embora os traços avaliados não tenham desenvolvido um nível de fissuração para serem definidos como *Engineered Cementitious Composites (ECC)*, como inicialmente objetivado, tanto o traço referência (ECC_{REF}) como o traço alternativo com incorporação de cinza de casca de arroz (ECC_{CCA}) demonstraram comportamento adequado ao uso proposto, exibindo bons resultados de resistência mecânica, deformação por retração, aderência entre o aço e o composto cimentício e frente as solicitações impostas pela cura acelerada.

Considerando os objetivos específicos, as seguintes conclusões podem ser obtidas a partir da análise dos resultados experimentais:

Com relação à determinação da combinação de aditivos superplastificante e acelerador de cura:

- Os melhores resultados combinados de índice de consistência, resistência à compressão simples e retração por secagem foram relacionados ao arranjo de aditivos com 0,2% de aditivo superplastificante Tecflow 8000 e 0,5% de aditivo acelerador de cura Daraset 100. Esse traço foi definido como referência (ECC_{REF}) e foi validado através da avaliação mecânica e aplicação em um modelo experimental de pequena escala.
- De forma complementar foi avaliado o percentual de aditivo e de substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz de um traço alternativo (ECC_{CCA}). Considerando todas as misturas avaliadas, a incorporação de 20% de cinza de casca de arroz, 0,36% de aditivo superplastificante Tecflow 8000 e 0,5% de aditivo acelerador de cura Daraset 100 exibiu o melhor comportamento combinado de trabalhabilidade e resistência à compressão simples na idade de 3 dias;

Com relação à avaliação das propriedades mecânicas e de retração dos traços referência (ECC_{REF}) e alternativo (ECC_{CCA}) para as idades de 24 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias:

- A melhoria das propriedades mecânicas do ECC com a incorporação parcial de cinza de casca de arroz ao traço referência é evidenciada através dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão;
- Em relação à compressão simples, com 24 horas de cura, o traço referência apresentou maior resultado de tensão de compressão que o traço alternativo, sendo os respectivos valores médios de 31,97 MPa e 21,62 MPa. Com o avanço da idade analisada, o ECC_{CCA} ultrapassou os valores referentes ao ECC_{REF} , exibindo maior resistência à compressão simples em 28 dias, sendo as resistências médias do ECC_{CCA} de 65,37 MPa e do ECC_{REF} de 55,15 MPa. Esse comportamento é relacionado à atividade pozolânica da cinza de casca de arroz, a qual exibe reações mais lentas comparadas ao cimento, e ao efeito filler que esse material proporciona quando incorporado ao concreto.
- Considerando o ensaio de resistência à tração na flexão, a maior parte dos corpos de prova exibiu comportamento próximo ao *deflection hardening*, porém com um reduzido número de fissuras, caracterizando-se pelo ganho de resistência do material após atingir o ponto de primeira fissura. Como exceção, o traço alternativo (ECC_{CCA}) exibiu um desempenho *deflection softening* aos 28 dias, característico de um compósito que apresenta fissuração única. Acredita-se que esse comportamento ocorreu porque a tensão de flexão do ECC_{CCA} ultrapassou a resistência à flexão da matriz cimentícia, transferindo a resistência do material após o ponto de abertura da primeira fissura apenas para a capacidade de resistência das fibras.
- Os resultados de deformação por retração, tanto livre quanto por secagem, não apresentaram diferenças significativas com a variação dos traços para a mesma condição de ensaio. Para todos os casos analisados, as maiores deformações foram associadas à retração livre comparadas à retração por secagem. Com relação à avaliação da variação de dimensões dos corpos de prova nos resultados da retração livre, valores menores foram relacionados aos corpos de prova de maior seção devido à maior relação volume/superfície dos elementos.
- O aperfeiçoamento do traço utilizado por Righi (2015) e Rodriguez (2018) permitiu melhores resultados de resistência à tração na flexão e compressão simples, na idade de 28 dias, especialmente para o traço alternativo. Com relação à resistência à tração na flexão no ponto de primeira fissura, o traço alternativo (ECC_{CCA}) apresentou resultados 46% superiores que Righi (2015) e 79% maiores que Rodriguez (2018). Considerando a

resistência à compressão simples as respostas do ECC_{CCA} foram superiores em 45,3% e 81,6%, respectivamente. Também se verificam redução nos resultados de retração livre comparando os valores descritos por Costa (2015) com os resultados dessa dissertação, sendo esses 23% inferiores para o ECC_{REF} e 16% para o ECC_{CCA}. Essas melhorias foram proporcionadas pela redução de aditivo superplastificante, possibilitando menor segregação da mistura, e pela incorporação do aditivo acelerador de cura.

- Os resultados de módulo de elasticidade à compressão exibem uma rigidez maior para o traço alternativo (ECC_{CCA}) comparado ao referência (ECC_{REF}), sendo os respectivos módulos de 27,73 GPa e 20,80 GPa. Da mesma forma, os valores de módulo obtidos através do ensaio de tração na flexão apresentam essa mesma relação para todas as idades avaliadas. Para o ECC_{CCA} os resultados do módulos à flexão em 24 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias foram de 14,23GPa, 15,81 GPa, 20,21 GPa e 23,78 GPa, enquanto para o ECC_{REF} foram de 10,71 GPa, 13,14 GPa, 15,89 GPa e 19,24 GPa.

Considerando os resultados da avaliação da aderência entre o ECC e o aço obtidos através do ensaio de cisalhamento oblíquo:

- Independentemente do traço considerado, a estratégia de aderência que avaliou ranhuras na superfície do aço combinadas à aplicação de resina epóxi proporcionou os melhores resultados frente ao cisalhamento oblíquo dentre as alternativas avaliadas, obtendo maior rigidez que as demais, demonstrando grande potencial de aplicação em uma situação real. Para o ECC_{CCA} os valores de médios encontrados para a tensão no plano de 40° foram de 13,89MPa e para o ECC_{REF} de 9,78MPa. Embora com resultados menores, a metodologia que considerou apenas o uso de resina epóxi para promover a adesão entre os materiais também demonstrou aplicabilidade com boa resistência ao cisalhamento oblíquo, porém com menores resultados de tensão de cisalhamento. Neste caso, os valores médios de resistência ao cisalhamento oblíquo foram 3,98MPa para o ECC_{CCA} e 2,57MPa para ECC_{REF}. A estratégia que não considerou material para promover ligação entre o aço e o ECC, descrita como referência, foi considerada ineficaz para uma situação real devido aos baixos resultados frente ao cisalhamento. Os valores de tensão de cisalhamento obtidos através dos ensaios foram de 1,93MPa para o ECC_{CCA} e 1,33MPa para o ECC_{REF};
- Analisando a variação dos traços para uma mesma metodologia de aderência, para todos os casos, o traço alternativo (ECC_{CCA}) apresentou maior resistência ao cisalhamento oblíquo que o referência (ECC_{REF}). Esses resultados são coerentes comparados as mesmas relações

encontradas para os ensaios de resistência à compressão simples e à tração na flexão. Da mesma forma o ECC_{CCA} demonstrou uma maior rugosidade superficial da matriz cimentícia que o ECC_{REF}, permitindo uma melhor aderência à resina epóxi e ao aço;

Com relação às conclusões obtidas através da análise dos modelos experimentais realizados:

- Verificou-se a viabilidade da utilização, em maior escala, da resina epóxi para promover aderência entre o aço e o ECC, tanto para o ECC_{REF} como para o ECC_{CCA}. O primeiro e o segundo modelo mantiveram adesão entre os materiais durante os 28 dias analisados, exibindo comportamentos semelhantes para todos os pontos de leitura de deformação. Também não foram verificadas manifestações patológicas na superfície dos pavimentos executados.
- Comprovou-se a necessidade de preparação adequada da superfície metálica antes da aplicação do epóxi para a manutenção da aderência entre o aço e o ECC, tanto nos ensaios de cisalhamento oblíquo como também com a experiência relatada com o segundo modelo experimental.
- Os resultados das deformações de retração restringida na base avaliadas através dos modelos experimentais evidenciaram a relação desta propriedade com as condições ambientais, especialmente de temperatura e umidade. Embora o ECC_{CCA} e o ECC_{CCA} não tenham sido mantidos nas mesmas condições ambientais para que possam ser comparados, destaca-se comportamentos semelhantes. Quando as condições ambientais permaneceram estáveis, os valores de retração também se mantiveram estáveis. Ao ocorrer pequenas elevações de temperaturas combinadas a umidades constantes ocorreram pequenas quedas nas deformações. Também, aumentos de temperatura combinados com reduções na umidade do ar provocam acréscimos significativos nas deformações de compressão.
- As condições superficiais de macrotextura do revestimento dos modelos experimentais 1 e 3 para uso foram consideradas adequadas em termos executivos de acordo com a especificação para pavimentos asfálticos. Com relação à microtextura, o revestimento do modelo experimental 1, moldado com o traço referência, exibiu valor próximo ao considerado aceitável. O modelo 3, moldado com o traço alternativo, não apresentou um valor de microtextura satisfatório, sendo necessárias melhorias no traço para adequação ao uso proposto neste estudo.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de entender as lacunas experimentais que não puderam ser abordadas ou aprofundadas nessa dissertação, principalmente devido a limitação de tempo, são apresentadas sugestões para estudos futuros:

- Aprofundar o estudo dos traços experimentais utilizados, trabalhando com a criação de um ECC autoadensável para aplicação como pavimento;
- Estudar a possibilidade de incorporação de aditivo modificador de viscosidade para melhorar a trabalhabilidade do ECC;
- Analisar diferentes incorporações de areias de maior granulometria ou materiais suplementares no ECC, a fim de promover melhores condições de microtextura e macrotextura para sua utilização como pavimento ou camada de recapeamento.
- Estudar diferentes arranjos de aditivo superplastificante e acelerador de cura para traços que utilizam materiais cimentícios suplementares com propriedades pozolânicas.
- Realizar ensaios de resistência mecânica e durabilidade para o traço estudado para definir o teor ótimo de substituição em massa do cimento Portland por CCA, mantendo-se a mesma relação água/cimento.
- Avaliar diferentes dosagens e tipos de resina epóxi para promover aderência entre o aço e o ECC;
- Verificar outras metodologias para promover aderência entre o aço e o ECC, como jateamento com granalha de aço ou incorporação de elementos soldados na superfície da chapa metálica;
- Avaliar o comportamento mecânico e de microfissuração de corpos de prova compostos por ECC e aço submetidos a ensaios de cargas cíclicas;
- Analisar outros modelos experimentais considerando ranhuras na superfície metálica mais aplicação do epóxi para promover aderência entre o aço e o ECC, além de outras metodologias de aderência;
- Analisar a aderência entre camadas de aço e ECC dos modelos experimentais simulando esforços cisalhantes proveniente dos veículos e reais condições de carregamento, com auxílio do simulador de tráfego do LAPAV.
- Simular numericamente os modelos experimentais para comparação com os resultados de laboratório.

- Realizar a análise estatística dos ensaios realizados neste estudo, calculando as equações de regressão linear que determinam o comportamento dos ensaios realizados;
- Realizar uma análise do ciclo de vida (LCA) e análise dos custos do ciclo de vida (LCCA) de uma ponte metálica com pavimento de ECC, comparando a sua aplicação com pavimentos convencionalmente adotados;
- Estudar a capacidade do ECC de selagem de suas próprias fissuras, propriedade denominada de *self-healing*, especialmente considerando a aplicação do material sobre tabuleiros metálicos;

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157/C157M**: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. Estados Unidos: ASTM,2017. 8 p. Disponível em: https://doi.org/10.1520/C0157_C0157M-17

_____.**ASTM C1609/C1609M** : Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). Estados Unidos: ASTM,2019. 9 p. Disponível em: https://doi.org/0.1520/C1609_C1609M-19A.

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

_____.**NBR 8522**: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 26 p.

_____.**NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 2 p.

_____.**NBR 16504**: Misturas asfálticas – Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – Métodos da mancha de areia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 11 p.

_____.**NBR 16505**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 8 p.

_____.**NBR 16780**: Sinalização horizontal viária – Medição da resistência à derrapagem de uma superfície utilizando o pêndulo britânico. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 11 p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de Concreto**. 3a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p. ISBN: 978-85-86238-90-1

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites** - Modern Concrete Technology Series. 2a ed.: Abingdon, Inglaterra; Nova York, EUA: Taylor & Francis. 625 p. ISBN13: 978-0-203-08872-2 (ebk)

CASAGRANDE, Édina. **Compósitos Cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante: estudo do desempenho em pavimentos de concreto**. 2012.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CAETANO, Luciane Fonseca. **Avaliação do potencial de uso de materiais porosos como agregados para a cura interna de concretos com reduzida relação a/c**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CHOUCHA, Said *et al.* Effect of natural pozzolan content on the properties of engineered cementitious composites as repair material. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, Algéria, May, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0394-x>

CORLEY-LAY, Judith B. Friction and surface texture characterization of 14 pavement test sections in Greenville, North Carolina. **Transportation Research Record**, [S. l.], n. 1639, p. 155–161, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1639-17>

COSTA, Fernanda Bianchi Pereira da. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COSTA, Fernanda Bianchini Pereira da. *et al.* Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, Brasil, v. 213, p. 505-513, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.092>

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM: **ET-DE-P00/040**. Pavimento de concreto de cimento portland sobre plataforma de terraplenagem – Manual. São Paulo, 2007. 23 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM: **DNER-ME 194/198**. Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1998. 4 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2º ed. Rio de Janeiro, 2006, 314 p.

DIRETORIA DE OBRAS E COOPERAÇÃO – DOC. Lançamento de placa de concreto. *In: Guia de trabalhos de engenharia*. Exército Brasileiro, Cap 13, 2012. Disponível em: http://www.doc.eb.mil.br/downloads/gte/1gptE/Capitulo13_Placa_de_Concreto_Pavimento_Rigido_Versao2.pdf

GAO, Shuling *et al.* Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC). *Construction and Building Materials, China*, v. 179, p. 172–185, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.203>

GARCEZ, Estela Oliari. **Investigação do Comportamento de Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GUIMARÃES, Poliana Avelar. **Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

HAN, Weiwei *et al.* Experimental and Numerical Study on Fracture Characteristics of Interface between In Situ Engineered Cementitious Composites and Steel Deck. **Advances in Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 2021, n. Article I

HOERNER, Todd E. *et al.* Current Practice of Portland Cement Concrete Pavement Texturing. **Transportation Research Record**, [S. l.], n. 1860, p. 178–186, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1860-20>

HUANG, YANG H. **Pavement Analysis and Design** n. 2a ed. EUA: Pearson Education, 2004. 785 p. E-book. ISBN: 0-13-142473-4

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - JSCE. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). Japão: Concrete Engineering Series 82, 113 p. 2008.

KANAMARLAPUDI, Lakshmisupriya *et al.* Different mineral admixtures in concrete: a review. **SN Applied Sciences**, Ananthapur, Índia, v. 2, n. 4, p. 1–10, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2533-6>

KARAHAN, Okan; ATIS, Cengiz Duran. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. **Materials and Design**, Turquia, v. 32, p. 1044–1049, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>

KROUMA, Abla; SYED, Zubair Imam. A review on the use of engineered cementitious composite in bridges. **Materials Science Forum**, Abu Dhabi, Emirados Árabes Unidos. v. 860, p. 125–134, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.860.125>

KUNIEDA, Minoru; ROKUGO, Keitetsu. Recent progress on HPFRCC in Japan required performance and applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Japão, v. 4, n. 1, p. 19–33, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.3151/jact.4.19>

LEUNG, Christopher K. Y. DESIGN CRITERIA FOR PSEUDODUCTILE FIBER-REINFORCED COMPOSITES. **Journal of Engineering Mechanics**, [S. l.], v. 122, n. 1, p. 10–18, 1996.

LI, M. Engineered cementitious composites for bridge decks. In: **Advanced Composites in Bridge Construction and Repair**. EUA: Elsevier Ltd, 2014. cap. 7, p. 177–209. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1533/9780857097019.2.177>

LI, Victor. Engineered Cementitious Composite (ECC):Material, Structural, and Durability Performance. In: NAWY, G. Edward. **Concrete Construction Engineering Handbook**. Boca Raton, EUA. 2008. Cap 24, p. 1024.

LI, Victor C. *et al.* On the Shear Behavior of Engineered Cementitious Composites. **Advanced Cement Based Materials**, v. 1, p. 142-149, March 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)90045-0](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)90045-0)

LI, Victor C. Engineered Cementitious Composites (Ecc) – Tailored Composites through Micromechanical Modeling. **Canadian Society for Civil Engineering**, [S. l.], p. 1–38, 1997.

LI, Victor C. Engineered Cementitious Composites (Ecc) – Tailored Composites through Micromechanical Modeling. In: **Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future**, Canadian Society for Civil Engineering, p. 64-97, 1998. Disponível em: https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/84667/csce_tailoredecc_98.pdf?sequence=1&isAllowed=y

LI, Victor C. **Engineered Cementitious Composites (ECC): Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure**. 1. ed. Ann Arbor, MI, USA: Springer, 2019. v. 1. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58438-5>

LI, Victor C.; WANG, Shuxin. **High early strength engineered cementitious composites**. US 7,799,127 B2. Concessão: 2010.

MA, Hui *et al.* Investigation on the adhesive characteristics of Engineered Cementitious Composites (ECC) to steel bridge deck. **Construction and Building Materials**, China, v. 191, p. 679–691, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.056>

MA, Hui; QIAN, Shunzhi; LI, Victor C. Influence of fly ash type on mechanical properties and self-healing behavior of Engineered Cementitious Composite (ECC). **Construction and Building Materials**. China, v. 191 p. 679- 691, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21012/fc9.209>

MINDESS, Sidney; FRANCIS J. Young, DARWIN, David. **Concrete**. 2a ed. Sidney: Personal Education, p. 657, 2002. ISBN: 0-13-064632-6

NAAMAN, Antoine E. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. In: **High-Performance Construction Materials: Science and Applications**. Ann Arbor, MI, USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, v. 2, p. 91-153, 2008. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.3151/coj.54.5_565

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5a ed. Porto Alegre/RS: Bookman editora LTDA, p. 912, 2016. ISBN: 978-85-8260-366-6

PASINATTO, Vanessa. **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 (Bacharelado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PADILHA, Diego; ADAMI, Otávio. **Reologia do Concreto: Fatores influentes para previsão da retração e fluência**. [S. l.]: Dialética, 2021. *E-book*.

PEREIRA, Deividi da Silva. Estudo do comportamento de pavimentos de concreto simples em condições de aderência entre placa de concreto e base cimentada ou asfáltica. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

QI, C.; WEISS, J.; OLEK, J. Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function. **Materials and Structures: EUA**, v. 36, p. 386–395, July 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02481064>

RACENA, Fernando Antônio Piazza. **Retração do Concreto**. Porto Alegre-RS: EDIPUCRS, 2014. *E-book*.

RAUT, M. V.; DEO, S. V. A Review on Effect of Fly Ash and Fibers on Shrinkage Cracking and Durability. In: UKIERI Concrete Congress -Concrete Research Driving Profit and Sustainability, 2015, Punjab, Índia. **Anais [...]**.Índia: UKIERI, 2015. p. 748–771. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284481064_A_REVIEW_ON_EFFECT_OF_FLY_ASH_AND_FIBERS_ON_SHRINKAGE_CRACKING_AND_DURABILITY_OF_CONCRETE

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Princípios da ciência dos materiais cimentícios: produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos**. 1ª ed. Curitiba: [s. n.], 2021. *E-book*.

RIGHI, Débora Pedroso. Caracterização do Comportamento de Compósitos 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, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0102-33061996000200017>

RIGHI, Débora Pedroso *et al.* Tensile behaviour and durability issues of Engineered Cementitious Composites with Rice Husk Ash. **Revista Matéria**, Porto Alegre/RS, v. 22, n. 2, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0182>

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

SANTOS, Anthony Gomes dos; ASSIS, Rosuel Krum Mathias de; FERNANDES, José Leomar Júnior. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **Revista Transportes**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 89-101, Agosto 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v27i2.1597>

SPECHT, Luciano Pivoto *et al.* Restauração do pavimento do vão móvel da Pote do Guaíba utilizando revestimento asfáltico como SBS+TLA. **Revista Estradas**, n 17, p. 24-31. Dezembro 2012.

WANG, Kejin; CABLE, James K.; GE, Zhi. Evaluation of Pavement Curing Effectiveness and Curing Effects on Concrete Properties. **Journal of materials in civil engineering**, EUA, v. 18, n. 3, p. 377–389, June 2006. Disponível em: [https://doi.org/0.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:3\(377\)](https://doi.org/0.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:3(377))

WANG, Shuxin; LI, Victor C. High-Early-Strength Engineered Cementitious Composites. **ACI Materials Journal**, n. 103, p. 97–105, April-March 2006. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/678a/1d9fe088dc851477b1f6c3d31276cbef05cb.pdf>

WEIMANN, M. B.; LI, V. C. Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC). **International Journal for Restoration of Buildings and Monuments**, USA, v. 9, n. 5, p. 513–534, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/rbm-2003-5791>

WU, Shuyin *et al.* Experimental Study of Environmental Conditions on In-Situ Engineered Cementitious Composites-Steel. **Applied sciences**, [S. l.], v. 10, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/doi:10.3390/app10062123>

YANG, En-hua. **Designing Added Functions in Engineered Cementitious Composites**. 2008. Tese (Doctor of Philosophy – Civil Engineering) – University of Michigan, EUA, 2008.

YILDIRIM, Gürkan; ÖZGÜR, Anil; MUSTAFA, Sahmaran. Engineered cementitious composites-based concrete. *In: Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*. Woodhead Publishing: Turquia, Cap 15, p. 387-427, 2018. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00015-0>

ZHANG, Duo *et al.* Discontinuous micro-fibers as intrinsic reinforcement for ductile Engineered Cementitious Composites (ECC). **Composites Part B: Engineering**. v. 184, n. 107741, p.1-20, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107741>

ZHANG, Jun *et al.* Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage. **Cement and Concrete Research: China**, v. 39, n. 4, p. 303–312, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.012>

ZHANG, Zhigang; HU, Jing; MA, Hui. Feasibility study of ECC with self-healing capacity applied on the long-span steel bridge deck overlay. **International Journal of Pavement Engineering**, China, v. 20, n. 8, p. 884–893, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1356173>

**APÊNDICE A – Dados complementares das leituras de massa nos ensaios de retração
livre e por secagem dos traços ECC_{REF} e ECC_{CCA}**

ECC _{REF} (2,5x2,5x28,5) IMERSÃO 28 DIAS				ECC _{REF} (2,5x2,5x28,5) SEM IMERSÃO				ECC _{REF} (10x10x28,5) SEM IMERSÃO			
Traço	Idade	Peso (g)	Peso Médio (g)	Traço	Idade	Peso (g)	Peso Médio (g)	Traço	Idade	Peso (g)	Peso Médio (g)
CP1	1	387,5	392,525	CP5	1	385,6	381,425	CP9	1	3410,4	3383,05
CP2	1	396,9		CP6	1	370,3		CP10	1	3392,5	
CP3	1	392,4		CP7	1	386,8		CP11	1	3347,9	
CP4	1	393,3		CP8	1	383		CP12	1	3381,4	
CP1	28	393,8	398,8	CP5	4	374,2	370,025	CP9	4	3372,9	3346,55
CP2	28	403,3		CP6	4	359,2		CP10	4	3357,7	
CP3	28	398,4		CP7	4	375,1		CP11	4	3311	
CP4	28	399,7		CP8	4	371,6		CP12	4	3344,6	
CP1	32	-	-	CP5	7	371,4	367,125	CP9	7	3358,1	3331,675
CP2	32	-		CP6	7	356,4		CP10	7	3342,7	
CP3	32	-		CP7	7	372		CP11	7	3295,8	
CP4	32	-		CP8	7	368,7		CP12	7	3330,1	
CP1	35	388,5	393,05	CP5	14	369,9	365,625	CP9	14	3347,7	3321,15
CP2	35	397,5		CP6	14	354,8		CP10	14	3332,3	
CP3	35	392,6		CP7	14	370,5		CP11	14	3285	
CP4	35	393,6		CP8	14	367,3		CP12	14	3319,6	
CP1	42	387	391,425	CP5	21	369,4	364,975	CP9	21	3341,6	3315,125
CP2	42	395,9		CP6	21	354,4		CP10	21	3326,2	
CP3	42	390,8		CP7	21	370		CP11	21	3279,1	
CP4	42	392		CP8	21	366,1		CP12	21	3313,6	
CP1	49	386,2	390,5	CP5	28	369	364,55	CP9	28	3337,5	3311,05
CP2	49	394,9		CP6	28	353,9		CP10	28	3322,2	
CP3	49	389,9		CP7	28	369,3		CP11	28	3274,8	
CP4	49	391		CP8	28	366		CP12	28	3309,7	
CP1	56	385,5	389,775	CP5	42	368,9	364,425	CP9	42	3332,2	3305,775
CP2	56	394,2		CP6	42	353,7		CP10	42	3316,8	
CP3	56	389,1		CP7	42	369,2		CP11	42	3269,7	
CP4	56	390,3		CP8	42	365,9		CP12	42	3304,4	
CP1	70	384,7	389,025	CP5	56	368,6	364,225	CP9	56	3328,5	3302,175
CP2	70	393,4		CP6	56	353,6		CP10	56	3313,2	
CP3	70	388,4		CP7	56	369		CP11	56	3266,1	
CP4	70	389,6		CP8	56	365,7		CP12	56	3300,9	
CP1	84	383,7	387,85	CP5	112	368,4	363,975	CP9	112	3317,2	3290,85
CP2	84	392,2		CP6	112	353,5		CP10	112	3301,8	
CP3	84	387,2		CP7	112	368,7		CP11	112	3254,8	
CP4	84	388,3		CP8	112	365,3		CP12	112	3289,6	

ECC _{CCA} (2,5x2,5x28,5) IMERSÃO 28 DIAS				ECC _{CCA} (2,5x2,5x28,5) SEM IMERSÃO				ECC _{CCA} (10x10x28,5) SEM IMERSÃO			
Corpo de prova	Idade	Peso (g)	Peso Médio (g)	Corpo de prova	Idade	Peso (g)	Peso Médio (g)	Corpo de prova	Idade	Peso (g)	Peso Médio (g)
CP1	1	396,3	392,275	CP5	1	408,7	393,4	CP9	1	3252,6	3305,75
CP2	1	398,3		CP6	1	379,6		CP10	1	3397,2	
CP3	1	375,1		CP7	1	395,8		CP11	1	3243,2	
CP4	1	399,4		CP8	1	389,5		CP12	1	3330	
CP1	28	402,7	398,25	CP5	4	390,3	375,4	CP9	4	3186,8	3244,625
CP2	28	404,7		CP6	4	362,2		CP10	4	3335,9	
CP3	28	380,3		CP7	4	377,8		CP11	4	3185,7	
CP4	28	405,3		CP8	4	371,3		CP12	4	3270,1	
CP1	32	-	-	CP5	7	387,9	373,1	CP9	7	3172	3229,275
CP2	32	-		CP6	7	359,9		CP10	7	3320,5	
CP3	32	-		CP7	7	375,5		CP11	7	3169,9	
CP4	32	-		CP8	7	369,1		CP12	7	3254,7	
CP1	35	395	391,2	CP5	14	386,6	371,8	CP9	14	3159,4	3216,65
CP2	35	397,6		CP6	14	358		CP10	14	3307,9	
CP3	35	373,8		CP7	14	374,4		CP11	14	3157,6	
CP4	35	398,4		CP8	14	368,2		CP12	14	3241,7	
CP1	42	393,3	389,5	CP5	21	385,2	370,725	CP9	21	3150,5	3207,475
CP2	42	395,7		CP6	21	357,8		CP10	21	3298,5	
CP3	42	372,2		CP7	21	373		CP11	21	3148,2	
CP4	42	396,8		CP8	21	366,9		CP12	21	3232,7	
CP1	49	392,7	388,775	CP5	28	384,9	370,475	CP9	28	3146,1	3203,05
CP2	49	394,9		CP6	28	357,5		CP10	28	3294,1	
CP3	49	371,5		CP7	28	372,7		CP11	28	3143,8	
CP4	49	396		CP8	28	366,8		CP12	28	3228,2	
CP1	56	391,3	387,475	CP5	42	384,8	370,3	CP9	42	3140,4	3197,325
CP2	56	393,7		CP6	42	357,5		CP10	42	3288,1	
CP3	56	370,2		CP7	42	372,4		CP11	42	3138,3	
CP4	56	394,7		CP8	42	366,5		CP12	42	3222,5	
CP1	70	390,3	386,425	CP5	56	384,7	370,325	CP9	56	3135,8	3192,6
CP2	70	392,5		CP6	56	357,5		CP10	56	3283,2	
CP3	70	369,2		CP7	56	372,5		CP11	56	3133,6	
CP4	70	393,7		CP8	56	366,6		CP12	56	3217,8	
CP1	84	388,3	384,475	CP5	112	385,8	371,2	CP9	112	3127,2	3183,575
CP2	84	390,4		CP6	112	358,3		CP10	112	3273,9	
CP3	84	367,5		CP7	112	373,3		CP11	112	3124,7	
CP4	84	391,7		CP8	112	367,4		CP12	112	3208,5	