

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

**INFLUÊNCIA DE ALTOS TEORES DE CINZA DE CASCA
DE ARROZ NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS,
MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE ENGINEERED
CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)**

DÉBORA PEDROSO RIGHI

Porto Alegre - RS
2022

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

DÉBORA PEDROSO RIGHI

**INFLUÊNCIA DE ALTOS TEORES DE CINZA DE CASCA
DE ARROZ NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS,
MECÂNICAS E DE DURABILIDADE DE ENGINEERED
CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)**

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

Área de Concentração: Construção

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

Porto Alegre - RS

2022

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

DÉBORA PEDROSO RIGHI

**INFLUÊNCIA DE ALTOS TEORES DE CINZA DE CASCA
DE ARROZ NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS,
MECÂNICAS E DE DURABILIDADE NOS ENGINEERED
CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)**

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Ângela Gaio Graeff – UFRGS

Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo – UFG

Prof. Dr. Abrahão Bernardo Rohden – FURB

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (Orientador) – UFRGS

Porto Alegre - RS

2022

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Zeneida e João Antônio, e ao meu marido, Lucas.
Mãe, que sempre foi a minha força. Pai, que sempre será meu anjo. Lucas, que sempre
esteve comigo.*

AGRADECIMENTOS

Primeiro, gostaria de agradecer a Deus, que sempre me amparou em seus braços, que nunca me permitiu desistir quando o câncer tentou me derrubar. E me fez mais forte ao encarar tudo isso e estar defendendo esse estudo.

A minha família, que é minha fortaleza. A minha mãe Zeneida que sempre foi os pilares que me sustentam a ficar de pé sempre. Ao meu pai João Antônio que hoje é a estrela que me guia do céu, saudades pai, sei que você estaria muito feliz comigo. Aos meus irmãos Samoel e Rafael por sempre estarem do meu lado me apoiando. E a minha irmã Andressa que foi o melhor presente de Deus, que está em todos os momentos da minha vida me apoiando e não me deixando desistir. Nós por nós para sempre.

Ao meu marido Lucas que acompanha a minha jornada acadêmica desde a graduação e sempre foi minha base segura para vencer os obstáculos, que esta seja apenas uma de muitas vitórias que conquistaremos juntos. Eu amo você.

Ao meu orientador Luiz Carlos, que sempre compartilhou do seu conhecimento para me fazer crescer como profissional, e todo o apoio na realização deste trabalho e pela amizade que conquistamos durante esse período de aprendizado, obrigada pela compreensão, e carinho que sempre teve comigo e por acreditar sempre nos meus sonhos e se tornar um pai na minha vida.

Aos meus amigos, por todo o apoio e carinho. Agradeço em especial a minha amiga Cíntia que nestes últimos anos se tornou minha irmã de alma. Agradeço também as minhas amigas Fernanda e Priscila por sempre estarem me apoiando mesmo a distância se fizeram tão presentes na minha vida. Não poderia deixar de fazer um agradecimento todo especial, com todo meu carinho a Bruna que sem ela, este trabalho não seria possível, obrigada por tanta dedicação e pela sua amizade que tenho certeza que será para a vida toda.

Agradeço aos colegas de trabalho do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) pelo bom convívio e amizade neste período de aprendizado, somos uma família. Especialmente ao Adriano, Daniele, Paola, Luiz Henrique que se tornaram muito mais que colegas, se tornaram minha família em POA.

Agradeço em especial ao técnico Seu Edgar pois sem ele, este trabalho não teria sido realizado, obrigada por sempre estar do meu lado e me auxiliando na realização de todos os ensaios.

Aos membros internos e externos da banca, pela contribuição.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos.

Agradeço a todos os demais amigos e familiares, que de alguma forma colaboraram para a minha formação e crescimento pessoal.

“Na Engenharia, a resiliência é definida como a medida em percentual da energia que pode ser absorvida dentro do limite elástico sem criar uma deformação permanente. Na vida, a resiliência é a capacidade de voltar ao seu estado normal depois de ter sofrido tensão.”

- Autor Desconhecido

RESUMO

O Engineered Cementitious Composite (ECC) é um tipo especial de compósito a base de cimento, reforçado com fibras, que apresenta alto desempenho mecânico e de durabilidade, acompanhado do controle da fissuração. Sua principal característica é a elevada ductilidade, devido à capacidade que tem de gerar fissuração múltipla sob solicitações de carregamento. Este compósito foi criado pelo professor Victor Li, da Universidade de Michigan, e nos últimos anos, o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do sul vem desenvolvendo uma linha de pesquisa focada no objetivo de adaptar o ECC com materiais locais. Neste intuito, fibras de polipropileno têm sido utilizadas em conjunto com a cinza da casca de arroz (CCA), visando a confecção de misturas que sejam mais viáveis economicamente e ambientalmente sustentáveis. O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo de misturas de (ECC) com fibras de polipropileno e elevados teores de CCA, sob aspectos reológicos, mecânicos e em relação a alguns aspectos indicativos de durabilidade. Esta avaliação visa compreender as características deste compósito, com intuito de estabelecer a melhor aplicabilidade deste material na construção civil e infraestrutura. Nesta pesquisa, o estudo dos ECCs foi dividido em 3 etapas. Na etapa 1, os ECCs foram obtidos em porcentagens de 30%, 50% e 70% de substituição em massa do cimento por CCA sem controle de queima, denominada neste estudo de CCA residual, e caracterizados por ensaios mecânicos de flexão à 4 pontos, resistência à compressão e abrasão e por processos deteriorativos de reação álcali-sílica e penetração de íons cloretos. Na etapa 2, a reologia da matriz cimentícia foi analisada por ensaios de mini-slump, tempo de fluxo por cone de Marsh, tensão de escoamento e viscosidade plástica, assim como os ECCs por mini-slump. Na etapa 3, foram realizadas avaliações do ciclo de vida e do custo ao longo do ciclo de vida dos ECCs, em dois cenários distintos. Primeiro, pela produção de 1m³ de material, e segundo, em um cenário de aplicabilidade como recapeamento de pavimentos. Os resultados obtidos indicaram que para etapa 1, o traço com 50 % foi o que apresentou melhores condições de resistência mecânica e durabilidade. Para etapa 2, observou-se que o empacotamento das partículas do traço padrão apresentou grande volume de partículas grossas, sendo necessário melhorar o seu empacotamento e sua curva de distribuição de diâmetro, para que um melhor desempenho do aditivo superplastificante seja alcançado. Por fim, a etapa 3 indicou que o cimento e a fibra de polipropileno são os materiais que mais impactam ambientalmente na produção do ECC. Porém, quando aplicado em pavimentos, por possuir maior durabilidade e vida útil, o uso deste ECC acaba tornando-se mais vantajoso, quando comparado com o uso como recapeamento para concreto de pavimento.

Palavras-chave: Engineered Cementitious Composite; Cinza de Casca de Arroz; Fibra de Polipropileno.

ABSTRACT

Engineered Cementitious Composites (ECC) are a special type of cement-based composite, fiber-reinforced and that presents high mechanical and durability performance. Its main feature is its high ductility, due to its ability to generate multiple cracking under load requests. This kind of composite was first proposed by Professor Victor Li, from the University of Michigan, and in recent years, the Laboratory of Structural Tests and Models (LEME) of the Federal University of Rio Grande do Sul has developed a line of research focused on adapting the ECC with local materials. In this regard, polypropylene fibers have been used together with rice husk ash (RHA), aiming at the production of mixtures that are more economically viable and environmentally sustainable. The present work has as its main objective the study of mixtures of (ECC) with polypropylene fibers and high levels of RHA, considering rheological, mechanical and durability aspects. This evaluation aims to understand the characteristics of the composite to establish the best applicability of this material in civil construction and infrastructure. In this research, the study of ECCs was divided into 3 stages. In step 1, ECCs were obtained with percentages of 30%, 50% and 70%, of cement mass replacement by residual RHA, and characterized in terms mechanical 4-point bending tests, resistance to compression and abrasion and by exposure to alkali-silica reaction and penetration of chloride ions. In step 2, the cement matrix rheology was analyzed using mini-slump, Marsh cone flow time, yield stress and plastic viscosity tests, as well as the ECCs by mini-slump. In step 3, ECCs evaluations with respect to the life cycle and cost over the life cycle were performed, in two different scenarios. First, for the production of 1m³ of material, and second, in an applicability scenario such as pavement resurfacing. The results obtained indicated that for step 1, the mixture with 50% was the one that presented the best conditions of mechanical strength and durability. For step 2, it was observed that the packing of the particles of the standard mix presented a large volume of coarse particles, being necessary to improve its packing and its diameter distribution curve, so that a better performance of the superplasticizer admixture is achieved. Finally, step 3 indicated that cement and polypropylene fiber are the materials that most impact the environment in the production of ECC. However, when applied to pavements, due to its greater durability and useful life, the use of this ECC ends up becoming more advantageous, when compared to the use as resurfacing for pavement concrete.

Keywords: Engineered Cementitious Composite; Rice Husk Ash; Polypropylene fiber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concepção dos comportamentos strain-softening e strain-hardening sob tensões de tração uniaxial	30
Figura 2 – Curva de tensão x deformação – Flexão a quatro pontos	33
Figura 3 – Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação	33
Figura 4 – Resistência à compressão de ECC (M45)	34
Figura 5 – Corpo de prova de ECC sendo ensaiado à compressão	35
Figura 6 – Situação dos pilares ensaiados (a) Concreto convencional (b) ECC	36
Figura 7 – Geometria da aplicação do ECC na ligação pilar-viga	37
Figura 8 – Ensaio pós carregamento (a) Traço com ECC (b) Traço com concreto armado	38
Figura 9 – Detalhamento das vigas.....	38
Figura 10 – Aparência das seções reparadas da ponte (a) Após execução (b) Após cinco anos de exposição ao tráfego e condições ambientais.....	39
Figura 11 – Curvas tensão x deformação dos sistemas de recapeamentos.....	40
Figura 12 – Curvas de tensão x deformação de corpos de prova com o uso de cinza volante - Ensaíados a tração direta	41
Figura 13 – Tensão x deformação de ECCs com combinações de cinza volante e escória de alto-forno em diferentes idades.....	42
Figura 14 – Misturas de ECC contendo rejeito de minério de ferro	43
Figura 15 – Amostras de ECC e argamassa após teste de corrosão acelerada (a) ECC após 300 horas de corrosão acelerada (b) Argamassa após 75 horas de corrosão acelerada (c) ECC após 350 horas corrosão acelerada (d) Argamassa após 95 horas acelerada corrosão	46
Figura 16 – Perda de massa dos corpos de prova de ECC e de argamassa ambos armados com uma barra de aço	47
Figura 17 – O aspecto e (a) Composição química (b) De um aglomerado de partícula de CCA, formada com produto típico da RAS, indicado pelos pontos a, b, c e d.	49

Figura 18 – Aspecto das barras de argamassa confeccionadas com agregado expansivo e 25% de CCA com fases cristalinas ao final do ensaio acelerado	50
Figura 19 – RAS dos ECC (a) Com cinza volante Classe F (b) Com cinza volante Classe C	51
Figura 20 – Detalhes do ensaio de carbonatação.....	52
Figura 21 – Profundidade de carbonatação do ECC com fibras de polipropileno	53
Figura 22 – Amostras carbonatadas com a aplicação da solução de fenolftaleína (PAS)	54
Figura 23 – Um caso extremo de variação de tração versus deformação do ECC com a mesma proporção de mistura.....	55
Figura 24 – Propriedades reológicas das sete misturas de ECC (a) Tempo de fluxo do cone Marsh (antes da adição de fibras) versus viscosidade plástica (b) Diâmetro de abertura do mini-slump flow (antes e depois da adição fibras) das sete misturas ECC .	57
Figura 25 – Tensão x deformação de 7 misturas de ECC	58
Figura 26 – Curvas de tensão x deformação de corpos de prova ensaiados a tração direta	67
Figura 27 – Processo de lançamento do material na conformação dos recapeamentos .	70
Figura 28 – Exsudação observada na construção do recapeamento de 50 mm.....	71
Figura 29 – Curva tensão x deformação dos compósitos sob (a) Tração direta (b) Flexão a quatro pontos	72
Figura 30 – Vigas após o ensaio de corrosão (a) Com remoção do concreto e pronta para receber o reparo com ECC e (b) Com o esquema de fôrmas criado para o reparo com ECC (Figura 30b)	74
Figura 31 – Corpos de prova após ensaio de flexão (a) viga de concreto armado sem corrosão; (b) viga de concreto armado após corrosão e (c) viga de concreto armado após corrosão reparada com ECC.....	75
Figura 32 – Ensaio de flexão a quatro pontos ilustrando a perda de medidas pelo LVDT	81
Figura 33 – Fluxograma do programa experimental	87
Figura 34 – Cinza de casca de arroz sem controle de queima.....	89
Figura 35 – Difratoograma da cinza de casca de arroz.....	89
Figura 36 – Curva granulométrica da areia fina	91
Figura 37 – Fibra de polipropileno monofilamento.....	92

Figura 38 – Configuração do ensaio de flexão a quatro pontos (a) Dimensões do corpo de prova (b) Corpo de prova durante o ensaio de flexão.....	95
Figura 39 – Ensaio de abrasão (a) Equipamento utilizado (b) Cortador rotativo.....	96
Figura 41 – Ensaio de reação álcali-sílica (a) Moldagem dos corpos de prova (b) Ensaio em andamento (c) Medição da retração.....	100
Figura 42 – Fluxograma da Fase 2	102
Figura 43 – Viscosímetro rotacional cilíndrico concêntrico de paredes lisas (Brookfield DV-II + Pro)	104
Figura 44 – Ensaio do Cone de Marsh	105
Figura 45 – Ensaio de abatimento do ECC.....	106
Figura 46 – Sistema de Produto do Cenário 1 (a) Produção dos ECCs (b) Produção do concreto	108
Figura 47 – Estrutura dos dois tipos de <i>overlay</i> em uma direção.....	116
Figura 48 – Sistema de produto do Cenário 2	117
Figura 49 – Curvas força x deslocamento (a) 30ECC 1 (b) 50ECC1 (c) 70ECC1	120
Figura 50 – Resultados de resistência à compressão.....	122
Figura 51 – Resistência à compressão versus módulo de elasticidade.....	125
Figura 52 – Correntes médias (A) obtidas no ensaio de penetração de íons cloretos ..	127
Figura 53 – Cargas médias (Coulombs) obtidas no ensaio de penetração de cloretos .	128
Figura 54 – Reatividade potencial dos traços com cinza de casca de arroz (a) Expansão máxima (b) Zoom mais aproximado do ensaio	130
Figura 55 – Reatividade Potencial dos traços com cinza de casca de arroz nas porcentagens de 55%, 60% e 65%.....	132
Figura 56 – Perda de massa dos corpos de prova de ECC	135
Figura 57 – Desgaste das superfícies e o aumento em 8x (a) 30ECC1, (b) 50ECC1 e (c) 70ECC1	136
Figura 58 – Perda de massa dos três traços estudados	137
Figura 59 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 30% de CCA residual (a) 30ECC1-0,6, (b) 30ECC-0,7 e (c) 30ECC-0,8.....	143
Figura 60 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 50% de CCA residual (a) 50ECC1-0,6, (b) 50ECC-0,7 e (c) 50ECC-0,8.....	145
Figura 61 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 70% de CCA residual (a) 70ECC1-0,6, (b) 70ECC-0,7 e (c) 70ECC-0,8.....	147

Figura 62 – Resultados de fluidez da matriz cimentícia dos ECCs conforme método de cone de Marsh (a) 30ECC, (b)50ECC e (c)70ECC	150
Figura 63 – Diâmetro do fluxo mini-slump (antes e depois da adição de fibras) das misturas (a) 0,6% de aditivo, (b) 0,7% de aditivo e (c) 0,8% de aditivo.....	152
Figura 64 – Aspectos do ensaio de abatimento das misturas de 30ECC.....	154
Figura 65 – Abatimento das misturas de 30% CCA residual (a) 30ECC-0,7% e (b) 30ECC-0,8%	156
Figura 66 – Empacotamento das partículas (a) 30ECC-0,6, (b) 50ECC-0,6 e (c) 70ECC-0,6	158
Figura 67 – Gráficos da correlação das categorias de impacto para diferentes traços analisados – cenário 1 (em relação a 100%).....	164
Figura 68 – Gráficos da correlação das categorias de impacto para diferentes traços analisados – cenário 1.....	169
Figura 69 – Gráficos da correlação das categorias de impacto para diferentes traços analisados – cenário 2.....	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Levantamento bibliográfico de estudos do ECC no Brasil.....	62
Tabela 2 – Levantamento bibliográfico do que já foi estudado em ECC e o que precisa ser melhor estudado	77
Tabela 3 – Caracterização química, física do cimento CP V-ARI MAX (dados do fabricante e de análise em laboratório).....	88
Tabela 4 – Características químicas e físicas da cinza de casca de arroz (CCA).....	90
Tabela 5 – Composição granulométrica da areia fina	91
Tabela 6 – Características da fibra de polipropileno	92
Tabela 7 – Nomenclatura utilizada na designação dos traços da fase 1	93
Tabela 8 – Proporções das misturas.	94
Tabela 9 – Classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos	99
Tabela 10 – Nomenclatura utilizada na designação dos traços da fase 2	102
Tabela 11 – Categorias de impacto ambiental do método CML-2001.....	107
Tabela 12 – Composição dos traços para 1m ³	110
Tabela 13 – Estimativa do consumo energético para moagem ultrafina em moinho de	111
Tabela 14 – Consumo de energia em uma central de concretagem.....	113
Tabela 15 – Processos produtivos dos materiais, com dados do <i>Ecoinvent</i>	113
Tabela 16 – Transporte dos materiais até a central de concretagem, com dados do <i>Ecoinvent</i>	114
Tabela 17 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto à resistência à compressão.	123
Tabela 18 – Resultados de módulo de elasticidade dos traços da fase 1	123
Tabela 19 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto ao Módulo de Elasticidade.....	126
Tabela 20 – Cargas Q médias e avaliação qualitativa da penetrabilidade de íons cloreto segundo a ASTM C1202	127

Tabela 21 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto à carga elétrica (ensaio de penetração de íons cloreto).....	129
Tabela 22 – Expansão média e classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias dos compósitos	131
Tabela 23 – Produção hipotética do hidróxido de cálcio	133
Tabela 24 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto à resistência ao desgaste abrasivo.....	138
Tabela 25 – Análise Qualitativa da Etapa 1	140
Tabela 26 – ANOVA da influência do aumento da adição de aditivo superplastificante nas misturas de ECC.....	151
Tabela 27 – ANOVA da influência do aumento da adição de aditivo superplastificante no ECC sem fibras.....	155
Tabela 28 – ANOVA da influência do aumento da adição de aditivo superplastificante no ECC com fibras	155

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACE-MLR - *Advanced Cementitious Materials* – Materials Research Laboratory
(Materiais Cimentícios Avançados – Laboratório de Pesquisa de Materiais)

ACV – Avaliação do ciclo de vida

ASTM – Norma Americana

BR - Brasil

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CCA – Cinza de casca de arroz

CO₂ – Dióxido de carbono

CP I – Cimento Portland Comum

CP V – Cimento Portland CP – 5

DFRCC - *Ductile Fiber Reinforced Cement Composites* (Compósito cimentício de alta ductilidade reforçadas com fibras)

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

EUA – Estados Unidos da América

FRC - *Fiber Reinforced Concrete* (concreto reforçado com fibras)

FRCC - *Fiber Reinforced Cement Composites* (Compósitos cimentícios reforçados com fibras)

GLO - Global

GPa – Gigapascal

HPFRCC - *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* (compósitos cimentícios de alta performance reforçados com fibras)

ICV – Inventário do Ciclo de Vida

KOH – Hidróxido de Potássio

LPAV- Laboratório de Pavimentação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LVDT - *Linear Variable Differential Transformer* (Sensor de medição linear)

mm – milímetros

MPa – Megapascal

N - Newton

N.m – Newton metro

N.ms – Newton metro segundo

NaCl – Cloreto de Sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

NBR - Norma Brasileira

PAS - Álcool Fenolftaleína

PVA - *Polyvinyl alcohol* (Álcool polivinílico)

RAA – Reação Álcali Agregado

RAS – Reação Álcali Sílica

T - Torque

TEC FLOW – Aditivo superplastificante

TUM - *Technical University of Munich* (Universidade Técnica de Munique)

UFPEL – Universidade Federal de Pelotas

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

µm – micrometro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	23
INTRODUÇÃO	23
1.1 JUSTIFICATIVAS	25
1.2 OBJETIVOS	28
1.2.1 Objetivo Geral	28
1.2.2 Objetivos Específicos	28
CAPÍTULO 2	29
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)	29
2.1.1 Desenvolvimento	29
2.1.2 Comportamento Mecânico	32
2.1.3 Aplicações	35
2.1.4 Materiais Cimentícios Suplementares	40
2.1.5 Aspectos de Durabilidade	43
2.1.5.1 Ataque de Cloretos	44
2.1.5.2 Reação Álcali-Sílica	47
2.1.5.3 Carbonatação	51
2.1.6 Propriedades Reológicas	54
2.1.7 Modelo Reológico Bingham	59
2.2 AVANÇOS DOS ESTUDOS SOBRE ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES NA UFRGS	61
2.3 APLICAÇÃO DO ECC COMO MATERIAL PARA RECAPEAMENTO DE PAVIMENTOS	66

2.4 ESTUDO DO ECC COM A UTILIZAÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ EM TERMOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E DURABILIDADE	71
2.5 ECC APLICADO EM ESTRUTURAS	74
2.6 ECC UFRGS: PRINCIPAIS AVANÇOS, CONTRIBUIÇÕES E NECESSIDADES DE AVALIAÇÃO	76
CAPÍTULO 3	85
MATERIAIS E MÉTODOS	85
3.1 MATERIAIS	87
3.1.1 Cimento	87
3.1.2 Cinza da casca de arroz (CCA) residual.....	88
3.1.3 Agregado miúdo	90
3.1.4 Fibra de polipropileno	92
3.1.5 Aditivos	93
3.2 ESTUDO DA ETAPA 1	93
3.2.1 Especificações dos traços e procedimento de mistura.....	93
3.2.2 Ensaio de Caracterização Mecânica e de Durabilidade	94
3.2.2.1 Flexão a Quatro Pontos	94
3.2.2.2 Módulo de Elasticidade	95
3.2.2.3 Resistência à Abrasão	96
Para avaliar o desgaste abrasivo do ECC para uma aplicação em pavimentos, é necessário conhecer a forma de desgaste que o compósito se dá ao atrito. O teste de abrasão utilizado nesta pesquisa se dá pelo método de corte e foi realizado de acordo com a ASTM C944 (2019). Este ensaio dá uma indicação da resistência ao desgaste dos ECCs, uma característica importante para ser avaliada para a qualidade de pavimentos e pontes sujeitas ao tráfego.	96
3.2.2.4 Resistência à Compressão	97
3.2.2.5 Penetração Íons Cloretos	97
3.2.2.6 Reação Álcali-Sílica	99
3.3 ESTUDO DA ETAPA 2	101
3.3.1 Análise da Reologia dos ECC-CCA.....	101

3.3.2	Determinação dos Parâmetros Reológicos, Trabalhabilidade e Mecânicos da Matriz Cimentícia	103
3.3.2.1	Viscosidade Plástica e Torque	103
3.3.2.2	Determinação da Fluidez pelo Método de Cone de Fluxo Marsh	104
3.3.2.3	Determinação da Trabalhabilidade pelo Método Mini-Slump Flow	105
3.4	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV	106
3.4.1	Cenário 1: Produção de ECCs	108
3.4.1.1	Objetivo e Escopo	108
3.4.1.2	Especificações do Traço	109
3.4.1.3	Análise do Inventário do Ciclo de Vida – Cenário 1	110
3.4.2	Cenário 2: Uso como <i>Overlay</i> em Pavimentos	115
3.4.2.1	Objetivo e Escopo	115
3.4.2.2	Recursos na Fase de Construção	117
3.4.2.3	Recursos na Fase de Uso	117
3.4.2.4	Recursos na Fase de Fim de Vida	118
	CAPÍTULO 4.....	119
	RESULTADOS E DISCUSSÃO	119
4.1	ETAPA 1: DEFINIÇÃO DA PORCENTAGEM DE CCA	119
4.1.1	Ensaio de Flexão à Quatro Pontos	119
4.1.2	Ensaio de Resistência à Compressão	122
4.1.3	Módulo de Elasticidade	123
4.1.4	Ensaio de Penetração de Íons Cloretos	126
4.1.5	Ensaio de Reação Álcali-Sílica	129
4.1.5	Resistência ao Desgaste Abrasivo	135
4.2	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA 1.....	138
4.3	ETAPA 2: REOLOGIA DOS ECC-CCA.....	142
4.3.1	Viscosidade Plástica e Torque	142
4.3.2	Fluidez pelo Método de Cone de Fluxo Marsh	149
4.4	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA 2.....	156
4.5	ETAPA 3: ANÁLISE DO CICLO DE VIDA.....	162

4.5.1	Cenário 1	162
4.5.1	Cenário 2	168
4.6	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA 3.....	179
	CAPÍTULO 5.....	181
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	181
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	184

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na última década, grandes avanços foram realizados na literatura internacional com relação aos *Engineered Cementitious Composites* (ECC), ou compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. O ECC é uma classe de compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho (HPFRCC), que apresenta alta ductilidade e resistência à tração, com adição de 2% de fibra (LI, 2007; RIGHI *et al.*, 2017).

O diferencial do ECC é que este apresenta comportamento de endurecimento por tensão, através de múltiplas microfissuras, sendo a espessura dessas fissuras autocontroladas, levando à tenacidade à fratura semelhante às ligas de alumínio. Foram desenvolvidos para aplicações que necessitam de alta ductilidade, como no caso de estruturas localizadas em locais de terremotos e àquelas expostas à ambientes agressivos. Estas características permitem classificar este concreto como superior ao convencional sob solicitações severas (MAALEJ *et al.*, 1995; LEPECH e LI, 2008).

Visto que ambos os concretos convencionais possuem comportamento mecânico frágil e apresentam fissuras quando expostos à solicitações mecânicas, os ECCs buscam suprir isto, aumentando a vida útil e durabilidade das estruturas sob condições ambientais extremas. As principais características do ECC incluem tração aprimoradas com presença de fissuras estreitas, o que implica em baixa permeabilidade e maior capacidade de resistir à ações do clima. Isto inibe também o processo de corrosão das armaduras (KEWALRAMANI *et al.*, 2017; EMARA *et al.*, 2021).

A deformação desses compósitos possui uma capacidade na faixa de 3-5%, cerca de 300 a 500 vezes a mais que o concreto e o concreto reforçado com fibras (FRC). Alguns estudos já demonstram experimentalmente a utilização desse material em elementos estruturais tais como vigas (LI e WANG, 2002), pilares (FISCHER e LI, 2002), paredes (KESNER e BILLINGTON, 2002) e ancoragem estrutural (PARRA-MONTESINOS e WIGHT, 2000). O ECC já ultrapassa elementos estruturais convencionais como o concreto armado em relação a

carga estrutural, capacidade de carga, deformabilidade e capacidade de absorção de energia sob condições cíclicas monotônicas (MA *et al.*, 2021).

Além disso, a alta ductilidade de tração do ECC, proporciona uma compatibilidade de deformação com o concreto existente, e a espessura das micro-fissuras no compósito leva a sua superior durabilidade sob várias condições de carga mecânicas e ambientais, tais como fadiga, congelamento e descongelamento, exposição a cloretos e retração de secagem (LI e LI, 2008; SAHMARAN *et al.*, 2007; LI e Li, 2009; LI e LI, 2011; LI *et al.*, 2010).

O ECC está emergindo em escala estrutural com aplicações na Europa, no Japão e nos EUA (LI *et al.*, 2006). No Brasil, o grupo de pesquisa LEME/UFRGS foi o pioneiro a estudar este tipo de compósito, onde visa principalmente adaptá-lo a materiais brasileiros. Um trabalho de grande destaque é a tese de doutorado desenvolvida por Estela Garcez em 2009, que utilizou fibras de polipropileno no ECC no intuito de verificar o seu desempenho mecânico para recapeamento de pavimentos. O grupo de pesquisa optou por adaptar o nome americano para um nome em português chamando o ECC de “compósito cimentício de elevada capacidade de deformação”.

A capacidade de produzir o ECC em escala comercial com propriedades mecânicas consistentes é crucial para a aceitação deste novo material de construção em várias aplicações estruturais. A variabilidade do comportamento de tração no ECC, tem sido observada em laboratórios de pequena escala e também em produção em larga escala, onde os fatores que mais influenciam são o tipo de misturador, procedimento de mistura, características dos materiais locais e a experiência do pessoal. Essa variabilidade indesejável é refletida na variabilidade do material quando submetido a tensões de tração (LI e WANG, 2006; HUANG e ZHANG, 2016).

A hipótese é que a variação na resistência à tração do ECC se deve principalmente à influência da reologia durante a mistura dos materiais, o que irá reger o comportamento mecânico do ECC. Notavelmente, a maioria dos ECCs no meio acadêmico internacional utilizam fibras de PVA curtas e distribuídas aleatoriamente com uma fração de volume de 2%. Durante a mistura do ECC, as fibras são adicionadas a matriz cimentícia (cimento, cinza volante, areia, água e aditivo) até atingir um aspecto de argamassa com fibras (ZHANG e ZHANG, 2018; FEI *et al.*, 2021).

Os detalhes de processamento, como tipo de misturador, velocidade de mistura, tempo e sequência, e a experiência da mão de obra podem influenciar as propriedades reológicas da matriz cimentícia do ECC (ECC antes da adição de fibras) e afetar fortemente a uniformidade

de dispersão de fibra, distribuição de tamanho dos poros de ar aprisionados na matriz e as propriedades de ligação na fibra / matriz no estado endurecido. Adicionalmente, embora 2% de fibras de PVA são comumente usadas para misturas de ECC, os materiais da matriz de diferentes lugares ou escolhidos para funções específicas, por exemplo, alta resistência inicial, pode levar a alterações nas propriedades reológicas e na microestrutura do ECC devido a mudanças plausíveis no tamanho de grão de partícula e a absorção de água (LI e LI, 2011; LI e LI, 2013).

Para que este tipo de compósito seja utilizado em escala comercial é primordial garantir a repetibilidade do comportamento mecânico e principalmente garantir uma trabalhabilidade adequada para que possa ser realizada a moldagem dos elementos estruturais semelhante ao concreto convencional. No Brasil, o ECC está sendo estudado com o uso da fibra de polipropileno e o uso da cinza de casca de arroz em sua matriz cimentícia, e até o momento não foram avaliadas as propriedades reológicas desse material visando obter diferentes trabalhabilidades para diferentes aplicações. Assim este estudo visa estudar parâmetros mecânicos, reológicos e alguns aspectos de durabilidade do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com materiais brasileiros para nortear as possíveis aplicações deste material na construção civil brasileira.

1.1 JUSTIFICATIVAS

O grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi o pioneiro em estudar o comportamento mecânico dos ECCs com a finalidade de adaptar esse compósito com materiais locais brasileiros, visando que este compósito possa ser utilizado na construção civil brasileira.

O primeiro trabalho realizado por Garcez (2009) foi uma parceria com o grupo de pesquisas do ACE-MRL (Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory) da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, liderada pelo Professor Victor Li. A autora testou a incorporação da fibra de polipropileno ao invés da fibra de PVA testada por Li (2003). O motivo da utilização de fibras de polipropileno se deu devido a necessidade de importação de fibras de PVA para o Brasil, o que tornava o ECC inviável para ser aplicado no país. Outro ponto a ser ressaltado no trabalho da autora foi a análise do ciclo de vida quando aplicado o ECC em recapeamentos de pavimentos asfálticos.

Dando seguimento aos estudos de Garcez (2009), o grupo de pesquisa LEME iniciou a utilização do agregado miúdo natural de origem quartzosa ao invés de utilizar uma areia artificial a base de sílica. O trabalho de Casagrande (2012) obteve os primeiros resultados mecânicos com a utilização de fibra de polipropileno e agregado miúdo natural.

Com o intuito de realizar misturas mais viáveis economicamente e mais sustentáveis, os trabalhos de Righi (2015) e Pereira da Costa (2015) realizaram um estudo de substituição do cimento Portland CP-V por cinza de casca de arroz (residual) sem controle de queima e com moagem controlada em laboratório. Righi (2015) focou no comportamento mecânico e Pereira da Costa (2015) realizou estudos de durabilidade do ECC com cinza de casca de arroz para começar a compreender onde este compósito teria mais êxito quando aplicado na construção civil.

Rodriguez Muñoz (2018) utilizou o mesmo traço desenvolvido pelo grupo de pesquisa LEME/UFRGS em pistas experimentais de pavimentos em escala real e constatou uma grande dificuldade de moldagem, devido a baixa trabalhabilidade que o compósito tem. Pasinato (2018) estudou a viabilidade do ECC quando aplicado como reparo/reforço estrutural e também constatou uma grande dificuldade de moldagem.

Seguindo a mesma linha de pesquisa de Rodriguez Muñoz (2018), o estudo de Molz (2021) também avaliou a aplicação do ECC como pavimentação para tabuleiros metálicos de pontes, dando ênfase na aderência do ECC e do tabuleiro metálico em um protótipo de escala reduzida.

Essa dificuldade de moldagem se deve a incorporação das fibras de polipropileno na matriz cimentícia do ECC. Desde que o grupo iniciou suas pesquisas sobre o ECC, não foram realizados estudos relacionados com a reologia desse compósito. O estudo da reologia do ECC é importante visto que esses parâmetros se tornam primordiais para as possíveis aplicações do ECC na construção civil. O comportamento *strain-hardening* no ECC é realizado pela interação entre a fibra, matriz e a interface fibra/matriz com base nos conceitos da micromecânica, sendo primordial que a matriz consiga transmitir os esforços as fibras para que o desenvolvimento da múltipla fissuração ocorra.

Este estudo hipotetiza que a reologia da matriz no estado fresco rege diretamente a dispersão das fibras e influência tanto no comportamento *strain-hardening* quanto no desenvolvimento da múltipla fissuração. Adicionalmente, o uso da cinza de casca de arroz como material suplementar em substituição ao cimento Portland pode ocasionar uma perda de desempenho devido a possuir uma massa específica diferente do cimento Portland quando não

há um refinamento no traço original. O grupo de pesquisa LEME/UFRGS a cada ano vêm estudando possibilidades de aumentar a porcentagem de substituição do cimento por cinza de casca de arroz, visto que este tipo de compósito possui um elevado consumo de cimento, chegando a se utilizar duas a três vezes mais do que um concreto convencional, o que acaba dificultando a inserção deste compósito no mercado.

Neste contexto, tais análises reológicas, análises mecânicas e aspectos de durabilidade, juntamente com a incorporação da cinza de casca de arroz na matriz cimentícia do ECC, são imprescindíveis quando se deseja compreender quais serão as melhores aplicações deste material, isto é, para se pode ser aplicado em elementos estruturais da construção civil, em obras de infraestrutura, viabilização a inserção desse material na construção civil.

Para contribuir com alguns fatores que ainda não se encontram bem difundidos no estudo do ECC com o uso de cinza de casca de arroz e fibras de polipropileno, é necessário o aprimoramento de misturas afim de contribuir para obter três tipos de aplicações diferentes do desempenho mecânico e de durabilidade e assim proporcionar as possibilidade de aplicação do ECC brasileiro na construção civil e infraestrutura do Brasil. Desta forma, este trabalho busca, em síntese, fornecer respostas para as seguintes perguntas:

- O aumento da porcentagem de substituição do cimento por cinza de arroz residual substituição pode influenciar nas propriedades já consagradas do ECC;
- O aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz residual pode causar alguma reação álcali-sílica no ECC;
- Em termos de durabilidade, a cinza de casca de arroz pode inibir o ataque a penetração de cloretos quando o ECC é aplicado na construção civil ;
- Os materiais locais brasileiros podem ser utilizados na matriz cimentícia do ECC sem afetar o seu desempenho;
- Quais variáveis devem ser controladas para que seja modificada a trabalhabilidade dos ECCs com o uso da cinza de casca de arroz residual;
- Em termos reológicos, a relação água/aglomerante afeta significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade do ECC;
- Diferentes porcentagens de aditivos superplastificantes podem modificar a trabalhabilidade sem necessidade de modificar a relação água/aglomerante;
- A cinza de casca de arroz pode modificar o aumento e/ou diminuição do ciclo de vida do ECC.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo estudar misturas de *engineered cementitious composites* (ECC) com fibras de polipropileno e elevados teores de cinza de casca de arroz, em termos mecânicos, reológicos, e de durabilidade, visando compreender suas características para definir quais as melhores aplicabilidades deste material na construção civil e em infraestrutura.

1.2.2 Objetivos Específicos

Diante do objetivo geral do trabalho, foram definidos os objetivos específicos, que delimitam um conjunto de fatores que caracterizam o comportamento mecânico, reológico e de aspectos de durabilidade do ECC com fibra de polipropileno e cinza de casca de arroz.

- a) Avaliar as porcentagens de cinza de casca de arroz na matriz cimentícia do ECC de 30% , 50% e 70% em substituição ao cimento Portland;
- b) Avaliar o comportamento mecânico das misturas de ECC com o incremento das porcentagens de substituição do cimento por cinza de casca de arroz;
- c) Analisar a influência da cinza de casca de arroz residual na matriz cimentícia do ECC em termos de indicadores de durabilidade por meio dos ensaios reação álcali-sílica, penetração de íons cloretos, desgaste abrasivo;
- d) Estudar traços de ECC com cinza de casca de arroz residual em termos reológicos, analisando tanto a matriz cimentícia quanto a mistura de ECC, propondo diferentes tipos de fluidez;
- e) Analisar o ciclo de vida e o custo do ciclo de vida dos *engineered cementitious composites* quando aplicados na construção civil.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)

2.1.1 Desenvolvimento

Os primeiros compósitos que surgiram por meio da união da matriz cimentícia com fibras são denominados de *Fiber Reinforced Concrete* conhecidos pela sigla FRC. Os autores Bentur e Mindess (1990) classificaram os FRC como um material contendo uma base de cimento e fibras discretas e descontínuas (aço, poliméricas e carbono), sem agregados graúdos incorporados no traço, esses compósitos também são conhecidos pela sigla FRCC (*Fiber Reinforced Cement Composites*) na literatura internacional.

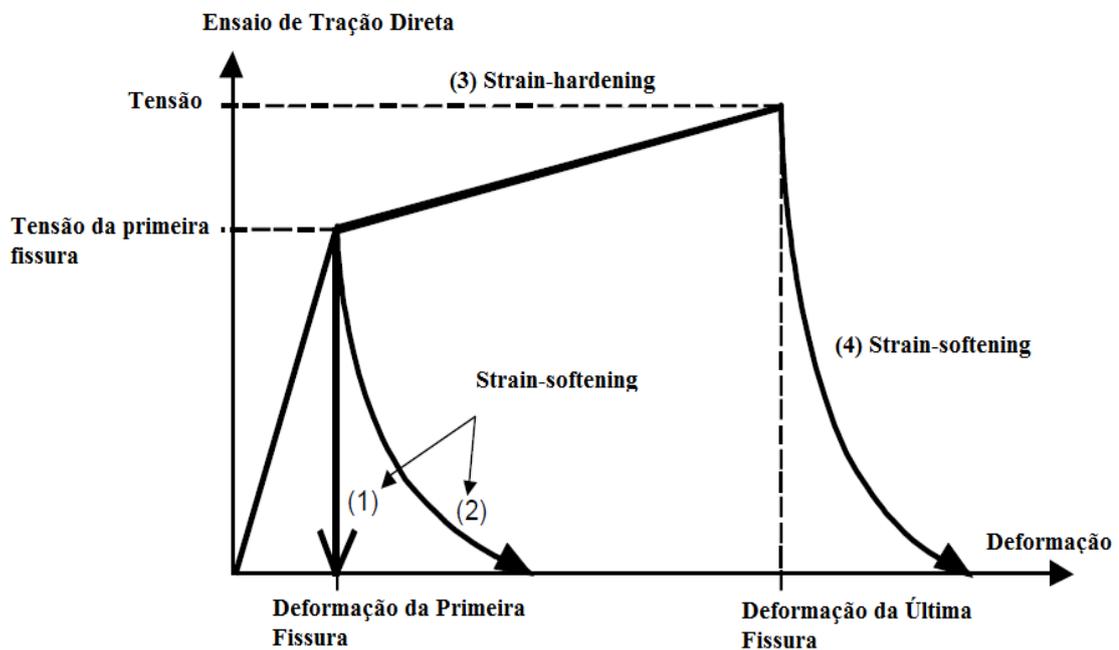
Estes tipos de compósitos quando submetidos a esforços de tração sofrem uma diminuição da tensão após o aparecimento da primeira fissura, ou seja, apresentam um amolecimento da matriz, conhecido pelo comportamento *strain-softening*. O autor Naaman (2008) caracteriza este comportamento *strain-softening* como uma perda da capacidade resistente progressiva após a primeira fissuração da matriz.

Novos estudos desenvolveram uma nova classe de compósitos dúcteis de alto desempenho reforçados com fibras, conhecidos como DFRCC (*Ductile Fiber Reinforced Cement Composites*). Estes compósitos apresentam um comportamento de endurecimento com formação de múltiplas fissuras na flexão, comportamento conhecido como *strain-hardening*. O comportamento *strain-hardening* tem a abertura de fissura em deformações baixas, mas com baixo controle da múltipla fissuração, dependendo exclusivamente das condições de cargas associadas (NAAMAN, 2008; HUNG e YEN, 2014).

A Figura 1 ilustra a diferença entre os comportamentos *strain-softening* e *strain-hardening*, onde se pode perceber que a após a abertura da primeira fissura os dois comportamentos começam a ser exibidos. Com relação ao comportamento *strain-softening*,

após a abertura da primeira fissura o compósito perde sua capacidade de suportar carregamento (tensões). O comportamento *strain-hardening* se refere à capacidade do compósito suportar carregamento após a abertura da primeira fissura, mantendo o nível de tensão e gerando um patamar de deformação pós primeira fissura (JSCE, 2008; MAGALHÃES *et al.*, 2014).

Figura 1 – Concepção dos comportamentos strain-softening e strain-hardening sob tensões de tração uniaxial



Fonte: JSCE (2008).

Na busca de suprir as deficiências que os compósitos obtinham em tensão de tração uniaxial foi concebida nos últimos anos uma classe nova de compósitos denominados de HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*). O diferencial destes compósitos é o endurecimento sob deformação, acompanhado do controle da múltipla fissuração (CHOI *et al.*, 2014; BRITO *et al.*, 2020).

Visando melhorar as propriedades dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, estudos foram desenvolvidos no início de 1990 por um grupo de pesquisas chamado ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*), na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, liderado pelo Professor Victor Li. Este grupo de pesquisa vem desenvolvendo um compósito cimentício de alto desempenho denominado de *Engineered Cementitious Composites* (ECC) (ZHANG, 2021).

Segundo Li (2003) o que diferencia o ECC de outros compósitos cimentícios reforçados com fibras é sua adição máxima de 2% de fibras em relação ao volume total do compósito. Estes compósitos foram projetados para resistir a altas tensões de tração e elevadas cargas de cisalhamento. O ECC possui uma elevada capacidade de absorção de energia e alta capacidade de deformação sob carregamentos de tração, resultando na formação de diversas múltiplas fissuras de pequena espessura durante o processo de ruptura deste compósito. Para se obter esse comportamento a matriz, a fibra e a interação fibra-matriz foram concebidas de acordo com as teorias de micromecânica e da mecânica da fratura.

Para se alcançar esta alta ductilidade, é dispensado o uso de agregados graúdos na mistura, apenas uma pequena quantidade de areia fina é aplicada na matriz para controlar a tenacidade da mesma. É importante também controlar a resistência da matriz no ECC, conforme demonstrado por Wang e Li (2007), onde a baixa resistência da matriz resulta em um aumento da capacidade de tensão da fibra, assim proporcionando o efeito chamado de múltipla fissuração.

Nos últimos anos o ECC começou a ser considerado como uma família de materiais com uma gama de resistências à tração e altas ductilidades que podem ser ajustadas dependendo das demandas de uma estrutura particular. O ECC também representa uma família de materiais com diferentes funcionalidades além das características comuns de alta ductilidade à tração e o processo de múltiplas fissuras, o traço de ECC consagrado por Li (2003) (por exemplo, ECC M45 e suas variantes) é projetado para uso local em grande escala em diversas aplicações de construção (KONG *et al.*, 2003; LEPECH e LI, 2007). Uma classe de ECC denominada HES-ECC, desenvolvida por Wang e Li (2006), visava a sua aplicação em pistas de pavimentação por possuir uma alta resistência inicial, proporcionando uma reabertura rápida da pista para ao tráfego de veículos.

Wang e Li (2003) realizaram dosagens no traço de ECC original com o intuito de tornar o mesmo como um compósito leve denominado de LW-ECC para aplicações onde a carga de uma estrutura deve ser minimizada. O *green* ECC (G-ECC) (ECC verde) foi estudado por Li *et al.* (2004) e Lepech *et al.* (2007) com a intenção de realizar misturas mais sustentáveis com a utilização de materiais cimentícios suplementares. E por fim a última classe criada do ECC é o compósito com “autocura”, ou seja, o SH-ECC enfatiza a funcionalidade de recuperar o transporte e propriedades mecânicas após receber cargas (YANG *et al.*, 2005; LI E YANG, 2007).

2.1.2 Comportamento Mecânico

Como mencionado no item anterior, os ECCs são caracterizados pela elevada ductilidade à tração. Segundo Li (2003) estes compósitos possuem elevada capacidade de absorção de energia e alta capacidade de deformação sob carregamentos de tração, resultado da capacidade de formação de múltiplas fissuras de pequena abertura durante o processo de ruptura destes compósitos.

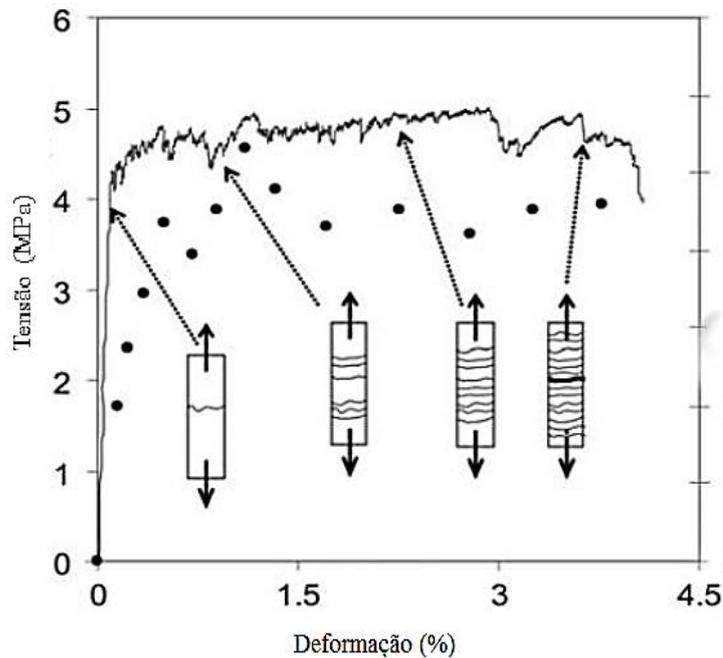
Quian e Li (2007) afirmam que este tipo de compósito atinge deflexões elevadas em ensaios de flexão a quatro pontos. Essa elevada capacidade de deformação à flexão levou os mesmos a serem reconhecidos, de forma popular, como “*Bendable Concretes*” (GARCEZ, 2009).

Para se atingir esta alta deflexão, o Professor Victor Li e sua equipe estabeleceram relações entre o comportamento mecânico microscópico dos compósitos e também estudaram as propriedades individuais de cada fase destes compósitos, ou seja, da fibra, da matriz e da interface fibra-matriz. Para Li (2003), usar os parâmetros e conceitos da micromecânica proporcionou o desenvolvimento de matrizes cimentícias reforçadas com fibras com dosagens racionais. A otimização dos compósitos com fibras, proporcionou a obtenção de um excelente desempenho com um volume pequeno de fibras.

O grupo de pesquisa do Professor Victor Li testou vários tipos de fibras, sendo a fibra de PVA a que apresentou melhores resultados. Garcez (2009) afirma que compósitos cimentícios com fibras de PVA têm as fissuras estabilizadas em 1% de deformação. Após isso, a abertura das fissuras não tem um aumento significativo até o momento da ruptura do compósito, ou seja, em torno de 5% de deformação. Este aumento de deformação se dá pelo processo de múltipla fissuração, que acaba mantendo as aberturas das fissuras existentes constantes.

Este comportamento proporciona o desenvolvimento de múltiplas fissuras através da transferência de carregamentos entre as fibras existentes. Na transferência de carga a fibra carrega outro ponto criando uma nova fissura, este processo repetitivo resulta na múltipla fissuração e o aumento da ductilidade do compósito, proporcionando que o compósito não rompa bruscamente e obtenha deformações superiores a 3% (LI, 2003). Para um melhor entendimento deste procedimento de múltipla fissuração, a Figura 2 detalha a curva tensão x deformação de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação.

Figura 2 – Curva de tensão x deformação – Flexão a quatro pontos



Fonte: WANG e LI (2007).

Garcez (2009) salienta que o comportamento de *strain-hardening* é o responsável pela característica mais importante deste compósito, pois o mesmo garante a alta ductilidade, permitindo que o compósito sofra elevadas deformações sem romper, como pode-se observar na Figura 3, que demonstra um corpo de prova após submetido ao ensaio a flexão.

Figura 3 – Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação

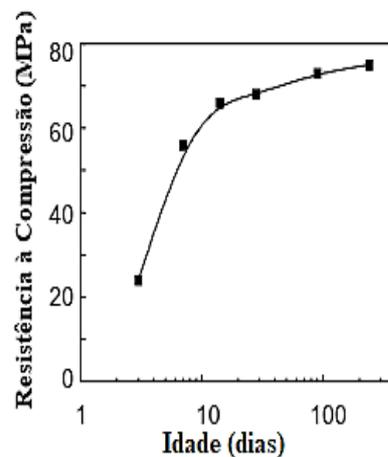


Fonte: LI e KANDA (1998).

A formação de múltipla fissuração é necessária para se obter uma alta resistência à tração e uma alta ductilidade. Entre a primeira tensão de ruptura (cerca de 0,01%) e a tensão de 1%, a abertura de fissuras aumenta de zero para cerca de 60 μm . Um carregamento superior à de 1% causa mais fissuras, mas sem criar um aumento da largura dessas fissuras, como ilustrado na Figura 1. A transferência de esforços que ocorre na interação fibra-matriz é extremamente importante para a durabilidade do ECC, pois a largura das fissuras é determinante para o bom funcionamento do ECC.

Yang *et al.* (2007) mencionam que em estruturas de concreto armado, o aço é utilizado para controlar a fissuração do concreto quando submetido a esforços de tração. ao utilização de ECC em elementos estruturais, proporcionaria um aumento da durabilidade além da impermeabilidade à água, pois não haveria fissuras de grandes larguras mesmo com grandes deformações estruturais impostas pelo carregamento. A Figura 4 demonstra os resultados de resistência à compressão do ECC com fibra de PVA.

Figura 4 – Resistência à compressão de ECC (M45)



Fonte: WANG e LI (2006).

A resistência à compressão do ECC não é significativamente superior a resistência de concretos convencionais. Normalmente a resistência varia de 30 MPa a 90 MPa, com um módulo de elasticidade (cerca de 20 a 25 GPa) tipicamente inferior ao do concreto, devido à ausência de agregados graúdos.

A Figura 5 mostra um corpo de prova cilíndrico sendo ensaiado à compressão. É possível perceber que o comportamento pós-pico de carregamento desse compósito sob esforços de compressão tende a descer mais suavemente do que concreto de alta resistência,

acompanhado por um abaulamento gradual da amostra em vez de falha de esmagamento com deslocamento do concreto.

Figura 5 – Corpo de prova de ECC sendo ensaiado à compressão



Fonte: WANG e LI (2006).

2.1.3 Aplicações

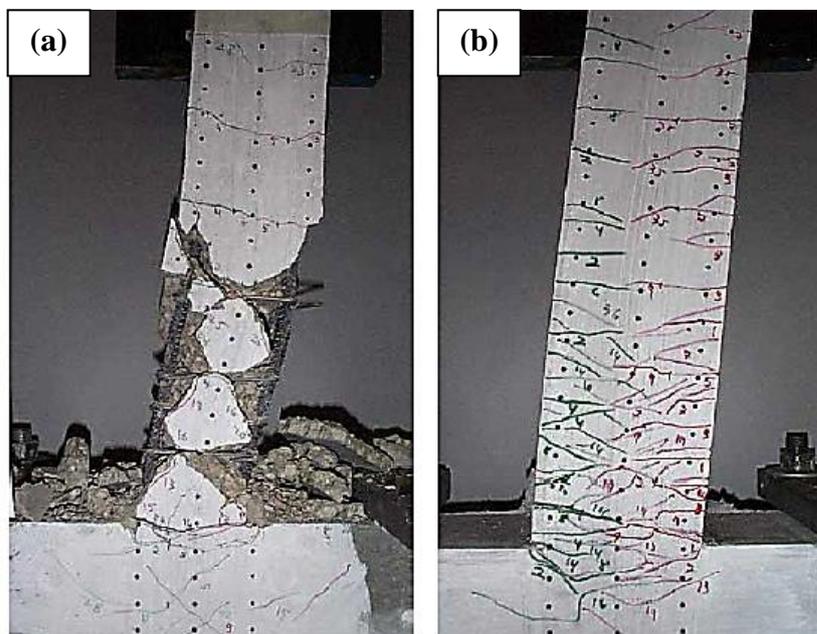
O uso de ECC para substituir o concreto convencional em estruturas de concreto armado tem mostrado resultados promissores, sempre correlacionado com a durabilidade dos mesmos. Rokugo *et al.* (2007) cita em seu estudo algumas dessas vantagens: alteração da espessura do cobrimento e também uma maior dificuldade de penetração de agentes agressivos. Ao contrário de concretos convencionais, o ECC possui uma múltipla fissuração na região de tração do elemento estrutural, as dimensões dessas micro-fissuras impede a entrada de agentes agressivos a armadura de forma tão rápida, diferente do concreto convencional que abre uma grande fissura que proporciona um ataque mais rápido ainda.

Essas vantagens levam a melhorias esperadas na durabilidade de elementos estruturais, uma vez que se dificulta o processo de corrosão no aço. Um grande número de pesquisas experimentais tem sido conduzidas com foco nas propriedades de transporte de agentes agressivos no ECC, especialmente quando já se encontram submetidos a esforços de tensão com a presença de múltiplas microfissuras, e no comportamento dos elementos ECC reforçados com aço em ambientes de teste acelerados.

Segundo Li (2003) os ECCs também têm excelente capacidade de resistir a esforços de cisalhamento. Sob esse tipo de carregamento, o compósito desenvolve a múltipla fissuração,

com o desenvolvimento de fissuras alinhadas na direção normal à direção das tensões principais de tração. O ECC possui um comportamento à tração dúctil e como consequência a resposta ao cisalhamento também é dúctil. Assim, elementos de ECC podem usar uma menor quantidade ou até mesmo dispensar o uso de armadura de cisalhamento. A Figura 6 ilustra um exemplo de ECC aplicado em pilares submetidos a esforços de cisalhamento. Analisando as Figuras 6a e 6b, verifica-se que, apesar da total eliminação dos estribos, a tolerância ao dano da estrutura confeccionada com o ECC armado (Figura 6b), é muito superior à registrada na estrutura confeccionada com concreto armado (Figura 6a), tendo a primeira claramente maior capacidade de conter o lascamento e desintegração do elemento.

Figura 6 – Situação dos pilares ensaiados (a) Concreto convencional (b) ECC

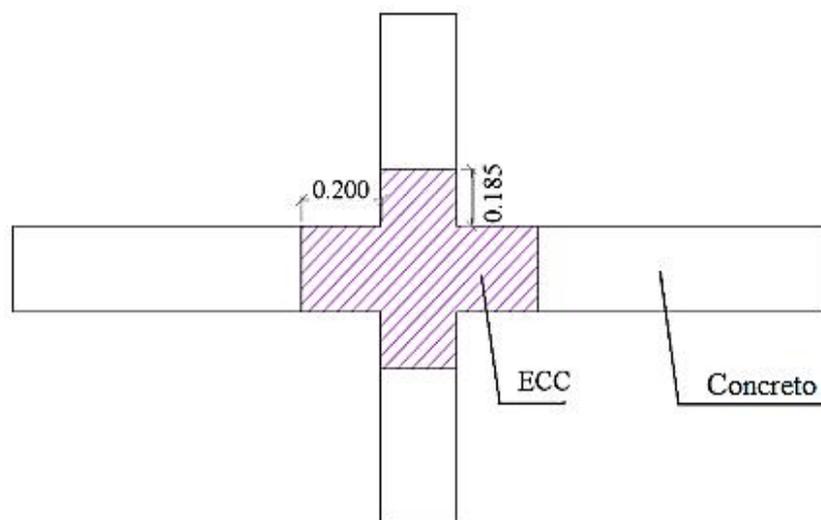


Fonte: LI (2003).

Fukuyama *et al.* (2000) estudaram o comportamento mecânico de pilares de ECC e de concreto referência sob cargas cíclicas. A força axial aplicada foi de 20% da resistência à compressão axial dos pilares, calculada sem a contribuição da armadura de aço. Os resultados encontrados pelos autores demonstraram que a resistência à fadiga foi melhorada nos pilares com ECC em relação aos de concreto. Para os pilares de concreto foi observado grandes fissuras que foram ocasionadas pela falha por esforços de cisalhamento. Já nos pilares com ECC não houve a falha por cisalhamento, foi mantida a múltipla fissuração e não houve a ruptura da armadura longitudinal.

Uma das possíveis aplicações do ECC em elementos estruturais é na ligação pilar-viga. O estudo dos autores Qudah e Maalej (2014) avaliou a viabilidade do uso de compósitos (ECC) como um meio para melhorar o desempenho dessas ligações. A Figura 7 ilustra como foi realizada a montagem dos protótipos, testados sob cargas cíclicas a fim de simular abalos sísmicos. A resposta de deslocamento da carga do pilar (incluindo a carga final e o deslocamento final), a capacidade de absorção de energia, e a abertura de fissuras foram utilizadas como critério na comparação.

Figura 7 – Geometria da aplicação do ECC na ligação pilar-viga



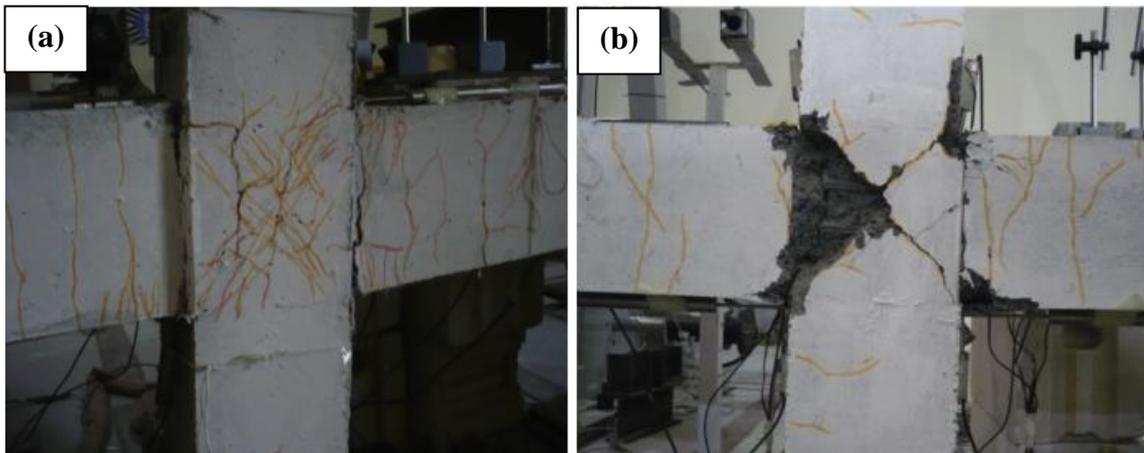
Fonte: QUDAH e MAALEJ (2014).

Os resultados de Qudah e Maalej (2014) indicaram que o ECC quando aplicado na zona de ligação pilar-viga como substituição parcial ou total do concreto pode melhorar significativamente a resistência ao cisalhamento nessa ligação. O ECC possui uma grande capacidade de absorção de energia e pela sua abertura de micro-fissuras aumenta a resistência sísmica dessa ligação, resistência muito necessária países que possuem constantemente terremotos. Este estudo ainda demonstra que é possível reduzir a área de aço nessa região, o que se torna uma alternativa interessante, visto que essa ligação exige uma grande complexidade de construção e ancoragem das armaduras. A Figura 8 ilustra algumas imagens após ensaio cíclico onde é possível perceber a múltipla fissuração do ECC (Figura 8a) quando comparado ao concreto armado tradicional (Figura 8b).

Rana *et al.* (2018) avaliaram a possibilidade de aplicação do ECC em elementos estruturais como vigas. Foram estudadas 4 vigas distintas, a primeira como referência em concreto, duas vigas com o ECC aplicado no zona de tração e compressão com diferentes

espessuras e, por fim, uma viga toda de ECC. Foi utilizado um perfil metálico em formato de I igual para todas as vigas conforme Figura 9.

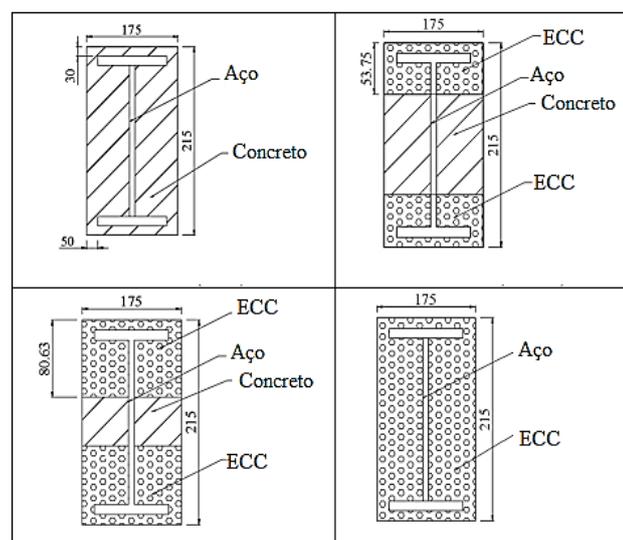
Figura 8 – Ensaio pós carregamento (a) Traço com ECC (b) Traço com concreto armado



Fonte: QUDAH e MAALEJ (2014).

Os resultados indicaram que a ductilidade do ECC aumentou a resistência residual da viga mesmo após o esmagamento por compressão. Está demonstrado que o desempenho de vigas tradicionais de aço-concreto pode ser melhorado substituindo o concreto convencional por ECC. Além do aumento de resistência a flexão, a combinação de ECC e aço poderia melhorar a ductilidade geral das vigas e reduzir o peso próprio.

Figura 9 – Detalhamento das vigas

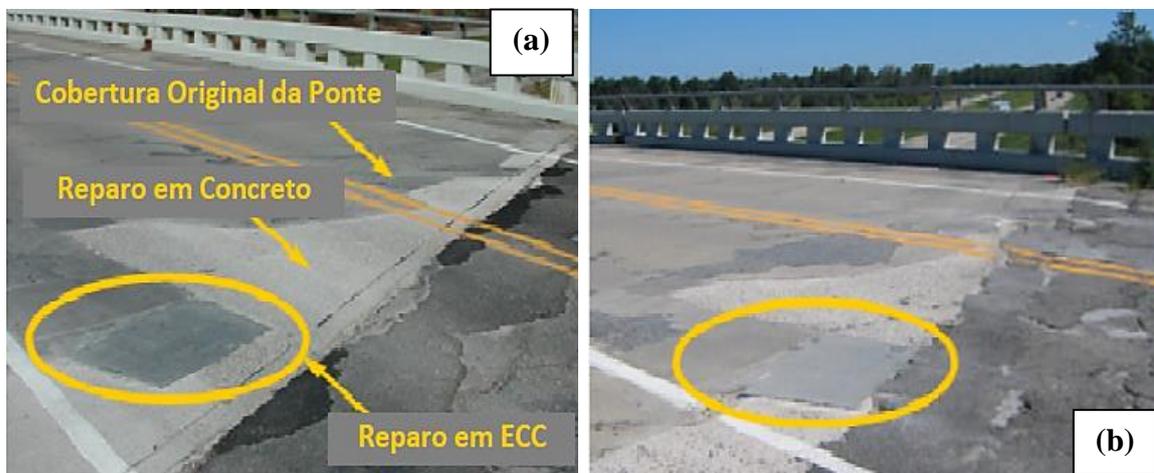


Fonte: RANA *et al.* (2018).

Outra possível aplicação desse tipo de compósito é como reparo em construção ou reabilitação de pavimentos rígidos e flexíveis. Li (2004) argumenta que em muitos países industrializados, as despesas com reparo de estruturas excede o valor de despesas de novas construções em um período de tempo não muito longo.

Os avanços conseguidos no desenvolvimento do ECC proporcionam um excelente comportamento *strain-hardening*, o que têm feito destes materiais excelentes opções para utilizações em reparos. Um exemplo de aplicação de ECC como reparo de pavimentos flexíveis foi desenvolvido na cidade de Ann Arbor, Michigan, nos Estados Unidos. Uma pequena faixa do pavimento deteriorado foi reparada com ECC, enquanto o restante da seção foi reparada com concreto comercial especial para reparos comumente utilizados pelas autoridades de transporte daquele estado. As imagens na Figura 10 mostram a aparência dos reparos logo após a execução dos mesmos (Figura 10a) e após cinco anos de monitoramento (Figura 10b). Pode-se perceber que nenhum dano significativo pode ser observado na faixa de ECC. Já na faixa de concreto a exposição dos agregados já era evidente (GARCEZ, 2009).

Figura 10 – Aparência das seções reparadas da ponte (a) Após execução (b) Após cinco anos de exposição ao tráfego e condições ambientais



Fonte: GARCEZ (2009).

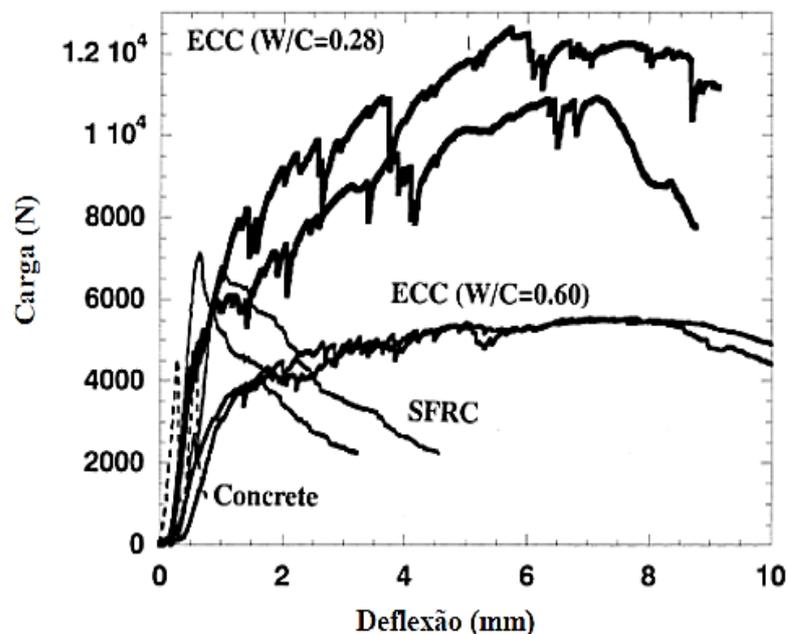
Os ECCs se tornam uma alternativa viável para recapeamentos de pavimentos devido a sua alta ductilidade e alta tolerância ao dano, podendo substituir recapeamentos de concreto e mistura de asfalto a quente, resultando em camadas de pequena espessura, duráveis e economicamente viáveis devido a sua baixa manutenção (QUIAN, 2007).

Kamada e Li (2000) investigaram o desempenho à flexão de recapeamento de concreto simples, concretos reforçados com fibras de aço (SFRC) e com ECC. A Figura 11 apresenta

Influência De Altos Teores De Cinza De Casca De Arroz Nas Propriedades Reológicas, Mecânicas E De Durabilidade Nos Engineered Cementitious Composites (ECC)

curvas de tensão-deformação dos sistemas estudados. Quando o ECC é utilizado como material de recapeamento sobre substrato de concreto, a capacidade de carga bem como a de deformação do sistema sob flexão podem ser sensivelmente incrementadas quando comparados aos demais sistemas. O incremento na ductilidade e o consequente aumento na capacidade de absorção de energia podem resultar no aumento da durabilidade dos sistemas de recapeamentos. Este efeito é o resultado das propriedades que os ECCs apresentam quando submetidos à esforços de tração.

Figura 11 – Curvas tensão x deformação dos sistemas de recapeamentos



Fonte: KAMADA e LI (2000).

2.1.4 Materiais Cimentícios Suplementares

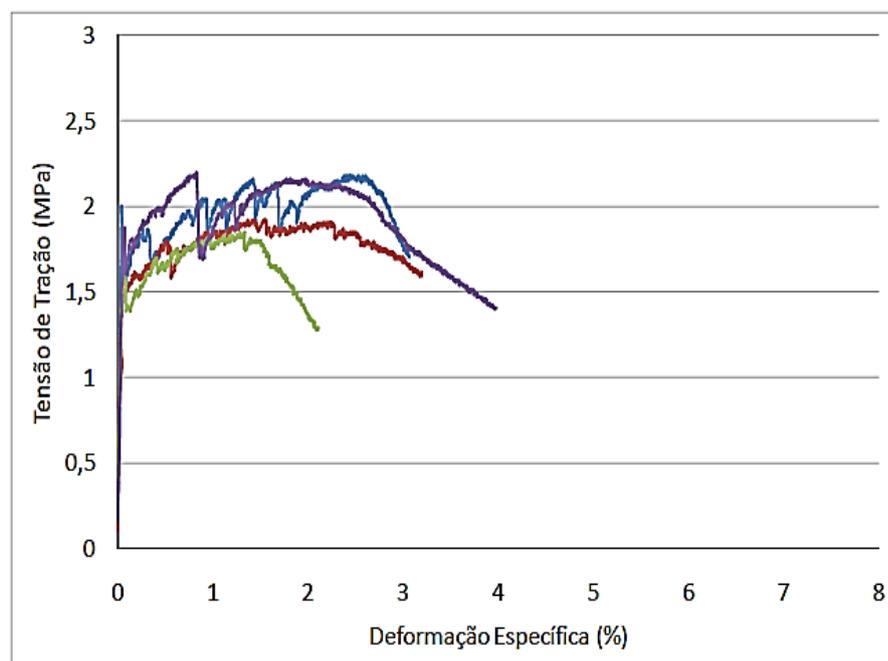
Na busca de criar uma classe de ECC classificada de *green* ECC (G-ECC) (ECC-verde) os primeiros trabalhos iniciaram seus estudos utilizando materiais cimentícios suplementares na matriz cimentícia do ECC. O Professor Li juntamente com sua equipe introduziu o uso da cinza volante incorporado à mistura.

Conforme apresentado no trabalho de Wang e Li (2007), a adição da cinza volante tornou-se fundamental para que seja possível atingir o comportamento de *strain-hardening*, por ajudar no controle da tenacidade da matriz melhorando em cerca de 2-3% este comportamento em longo prazo. Além disso, o uso da cinza volante mostrou uma melhoria no

comportamento de múltipla fissuração, reduzindo o impacto ambiental através da utilização de resíduos industriais na substituição do cimento.

A substituição parcial de cimento por cinza volante nos ECCs se torna uma alternativa economicamente interessante, pois é necessário utilizar uma elevada concentração de cimento no compósito, chegando a se utilizar duas a três vezes mais do que um concreto convencional (WANG e LI, 2007). Segundo Garcez (2009), a incorporação de cinza volante resulta numa redução de custo e pode colaborar numa diminuição das emissões de CO₂ globais resultantes da produção de compósitos cimentícios, especialmente associadas à produção de cimento, trazendo assim benefícios ambientais. A Figura 12 ilustra os resultados de tensão-deformação encontrados por Garcez (2009) utilizando relação 1:2 (cimento: cinza volante). Este ECC apresentou deformações médias em torno de 3% e tensões médias de 2 MPa.

Figura 12 – Curvas de tensão x deformação de corpos de prova com o uso de cinza volante - Ensaaiados a tração direta

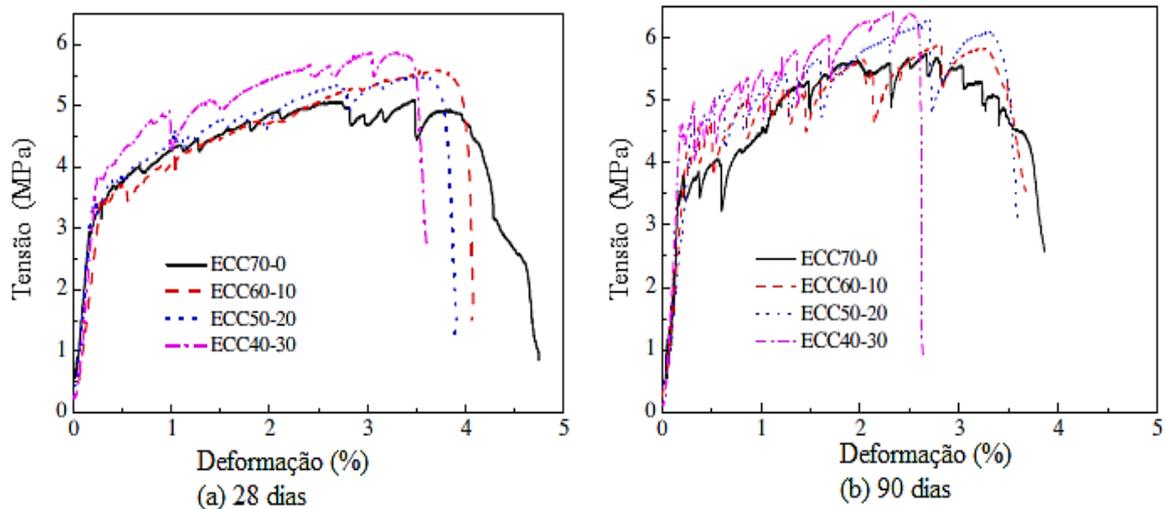


Fonte: GARCEZ (2009).

Zhu *et al.* (2014) estudaram a combinação da cinza volante com a escória de alto-forno em proporções de no máximo 70% nas idades de 28 e 90 dias. As proporções estudadas foram com 70% de cinza volante; 60% de cinza volante e 10% escória de alto-forno; 50% de cinza volante e 20% de escória de alto-forno e 40% de cinza volante e 30% de escória de alto-forno. Os resultados encontrados pelos autores são demonstrados na Figura 13.

Para todas as combinações binárias de cinza volante e escória de alto-forno percebe-se um aumento da capacidade de carga depois do aparecimento da primeira fissura com deformações variando entre 2,50% a 3,80% para todas as combinações. Em relação à idade de cura pode se perceber que não houve variação significativa entre a idade de 28 dias e 90 dias (YU ZHU, 2012).

Figura 13 – Tensão x deformação de ECCs com combinações de cinza volante e escória de alto-forno em diferentes idades

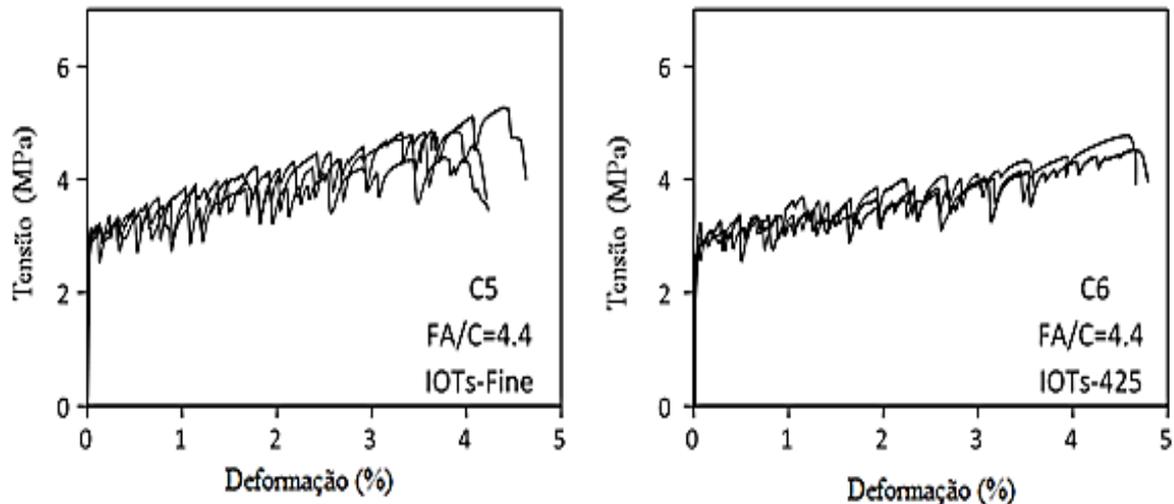


Fonte: ZHU *et al.* (2014).

No ano de 2013, os autores Huang *et al.* (2013) iniciaram estudos utilizando o resíduo de rejeito de minério de ferro como substituição ao agregado miúdo na matriz cimentícia do ECC. Além da utilização do resíduo, também foi o uso da cinza volante na proporção de 80% em relação ao cimento Portland. A Figura 14 ilustra os gráficos de tensão x deformação das misturas de ECC com rejeito de minério de ferro na granulometria fina e na passante na malha 425.

Os resultados mostram que ECC com rejeito de minério de ferro como agregado pode atingir propriedades de tração e compressão comparáveis às de ECC referência, desde que o tamanho dos rejeitos utilizados esteja na faixa apropriada, o que facilita a boa dispersão das fibras. Assim, a viabilidade da utilização de rejeitos de minério de ferro como agregados no desenvolvimento do ECC o classifica na classe de *green ECC*.

Figura 14 – Misturas de ECC contendo rejeito de minério de ferro



Fonte: HUANG *et al.* (2013)

Outro estudo que também utilizou porcentagens de 80% de cinza volante na matriz cimentícia do ECC foi o trabalho desenvolvido por Şahmaran e Li (2009), onde foram realizadas duas misturas contendo cinza volante com relação de cinza volante por cimento Portland de 1,2 e 2,2 em peso. Os resultados encontrados demonstram que o aumento da quantidade da cinza volante proporciona um efeito positivo no comportamento *strain-hardening* e no processo de múltipla fissuração. Com todos os estudos na bibliografia internacional indicando que altos teores de materiais cimentícios na matriz do ECC proporciona melhorias no seu comportamento mecânico, esta tese tem o intuito de extrapolar o máximo potencial de substituição do cimento por cinza de casca de arroz.

2.1.5 Aspectos de Durabilidade

Como um novo material de construção, não é suficiente ter excelente desempenho mecânico quando comparado com concreto convencionais, é importante também verificar a durabilidade do próprio material em vários ambientes típicos onde espera-se que os materiais sejam usados. Na maioria dos casos, os estudos são realizados sob condições aceleradas. No entanto, dados de desempenho a longo prazo são mais valiosos, embora sejam difíceis de obter, especialmente para materiais novos.

Como a característica principal do ECC é a alta ductilidade à tração, este material provavelmente pode ser usado em estruturas que impõem grandes deformações no material e

na pavimentação. Isso implica que a estrutura deve permanecer em serviço mesmo que o material seja submetido a esforços de tração acompanhados de múltiplas microfissuras. Nesta seção serão abordados três principais mecanismos de degradação do ECC – ataque por cloretos, ataque por carbonatação e reação álcali-sílica.

2.1.5.1 Ataque de Cloretos

Quando o ECC é aplicado em estruturas marítimas (pontes, plataformas, pavimentos) está sujeito a ataques de corrosão ocasionada pela penetração de cloretos. Li *et al.* (2007) avaliou o ECC com a múltipla fissuração evidente sendo exposto a uma concentração de 3% de NaCl por um período de 1, 2 e 3 meses. Os corpos de prova sofreram um pré-carregamento de 0% (corpo de prova íntegro), com fissuras com tensões de 0,5% e 1,5%.

Li *et al.* (2007) observaram que em todos os casos, os corpos de prova que foram pré-carregados obtiveram comportamento de múltipla fissuração após a exposição a cloretos mesmo com a largura média das fissuras tenha aumentado de 40 μm para 100 μm e a resistência à tração tenha sido reduzida em cerca de 10% quando comparado ao corpos de prova sem exposição a cloretos.

Um estudo combinando a taxa de penetração de íons cloretos e a taxa de corrosão de armaduras de aço foram estudadas por Miyazato e Hiraishi (2005). Foram moldadas vigas com a união de concreto armado e ECC (compósito na zona de tração da viga) e vigas de concreto armado para referência expostas por 28 dias ao ataque acelerado de cloretos. Os autores obtiveram resultados onde a penetração de cloretos atingiu 0-20 mm nas vigas que continham ECC e 80-100 mm nas vigas de referência. A taxa de corrosão total da armadura nas vigas com ECC foi de 0,0004 mm/ano, já nas vigas de referência esse valor dobrou chegando a 0,008 mm/ano.

A menor profundidade de penetração de íons cloretos, encontrada nas vigas com ECC foi devido à largura das fissuras, pois o concreto armado tem seu comportamento frágil em solicitações de tração, apresentando a abertura de uma única fissura de maior largura favorecendo assim o aumento da corrosão do aço.

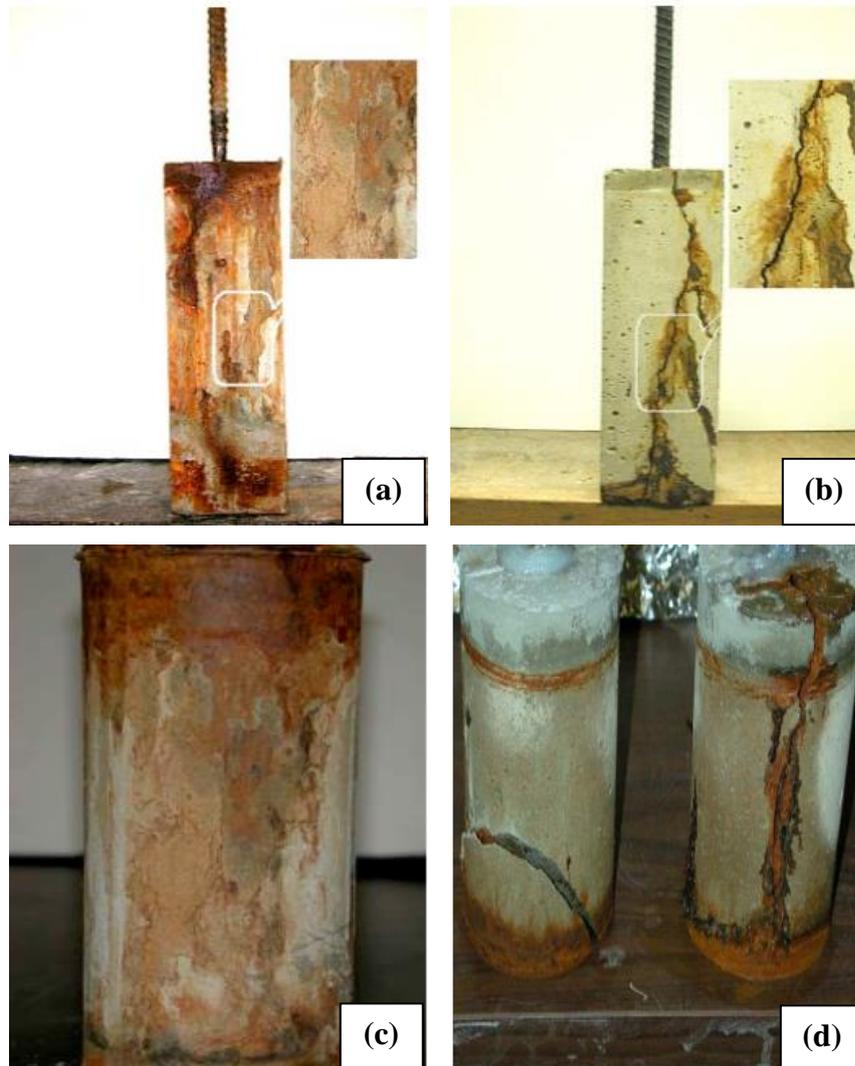
Şahmaran *et al.* (2008) também investigaram a utilização do ECC simulando sua aplicação como um elemento estrutural submetidos a corrosão acelerada pelo método eletroquímico, induzindo diferentes graus de corrosão no aço. Foram moldados corpos de

prova prismáticos de ECC e argamassas com uma barra de aço no seu interior e foi induzido um pré-carregamento para induzir o processo de múltipla fissuração nos corpos de prova.

A Figura 15 ilustra os corpos de prova após o ataque de corrosão acelerada. Os resultados demonstraram que os corpos de prova de argamassa aumentaram as suas fissuras conforme o aumento da idade do ensaio. Já para os corpos de prova de ECC a abertura das fissuras que foram pré-carregadas permaneceu constante ($\sim 0,1$ mm). Os resultados deste estudo também mostraram que o ECC não causou o deslocamento do corpo de prova como o que ocorreu com a argamassa convencional, com essas informações os autores calcularam que a vida útil do ECC armado seria pelo menos 15 vezes superior a de argamassa armada.

A corrosão nos corpos de prova de argamassa resultou em uma redução acentuada na rigidez e sua resistência a flexão. Após 25 horas de exposição acelerada à corrosão, a resistência a flexão foi reduzida a cerca de 34% da capacidade de flexão original da argamassa. Em contrapartida, os corpos de prova de ECC após 50 horas de exposição acelerada à corrosão mantiveram quase 100% da capacidade original de flexão dos corpos de prova de controle.

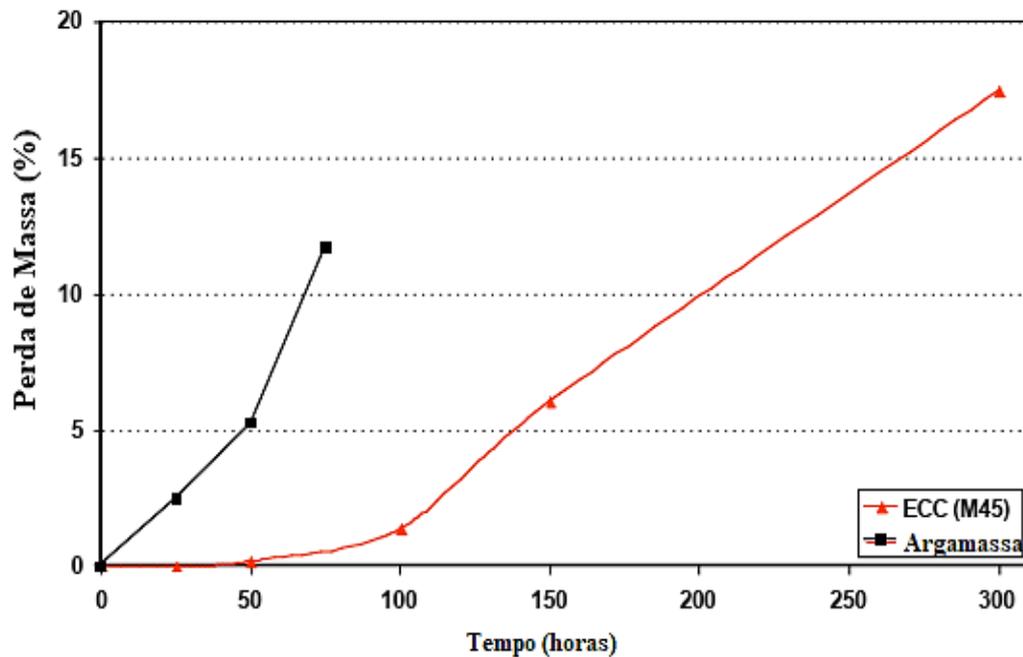
Figura 15 – Amostras de ECC e argamassa após teste de corrosão acelerada (a) ECC após 300 horas de corrosão acelerada (b) Argamassa após 75 horas de corrosão acelerada (c) ECC após 350 horas corrosão acelerada (d) Argamassa após 95 horas acelerada corrosão



Fonte: ŞAHMARAN *et al.* (2008).

A perda na capacidade de carga está relacionada com a perda de massa do reforço de aço devido à corrosão. A porcentagem de perdas de massa de aço dentro do ECC e das vigas de argamassa durante todo o processo acelerado de corrosão é apresentada na Figura 16. As médias da porcentagem de perda de massa de barras de aço embutidas nos corpos de prova de argamassa foram de 2,5%, 5,3% e 11,7% no final de 25, 50 e 75 horas de teste de corrosão acelerada. Por outro lado, não houve perda de massa de barras de aço nas amostras de ECC após 50 horas de testes de corrosão acelerada e a porcentagem média de perda de massa de barras de aço foi de 17,5% no fim de 300 horas de testes de corrosão acelerada.

Figura 16 – Perda de massa dos corpos de prova de ECC e de argamassa ambos armados com uma barra de aço



Fonte: ŞAHMARAN *et al.* (2008).

O desempenho superior observado do ECC em relação à argamassa em termos de tempo de propagação de corrosão, largura de fissura, menor perda de peso e maior resistência à flexão, é atribuível à alta capacidade de tração, comportamento *strain-hardening* e desenvolvimento de múltipla fissuração do ECC. O estudo de Şahmaran *et al.* (2008) indica uma curva de propagação da corrosão que poderia ser utilizada numa estimativa da vida útil de estruturas construídas com ECC.

2.1.5.2 Reação Álcali-Sílica

A reação álcali-sílica denominada de RAS é um tipo da reação álcali-agregado (RAA). É uma reação química que ocorre internamente no concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e contaminantes do meio com algumas formas minerais de sílica reativa presentes nos agregados ou adições minerais (TRINDADE, 2015).

O produto da RAS é referido na literatura como gel, devido sua morfologia, comportamento higroscópico e capacidade de fluir ao longo do concreto, dissipando tensões. Este gel tem sido estudado por um grande número de pesquisadores que reconhecem a

influência do tempo, temperatura, adições minerais (pozolanas) e tipo de cimento, na grande variabilidade de sua composição química (TRINDADE, 2015).

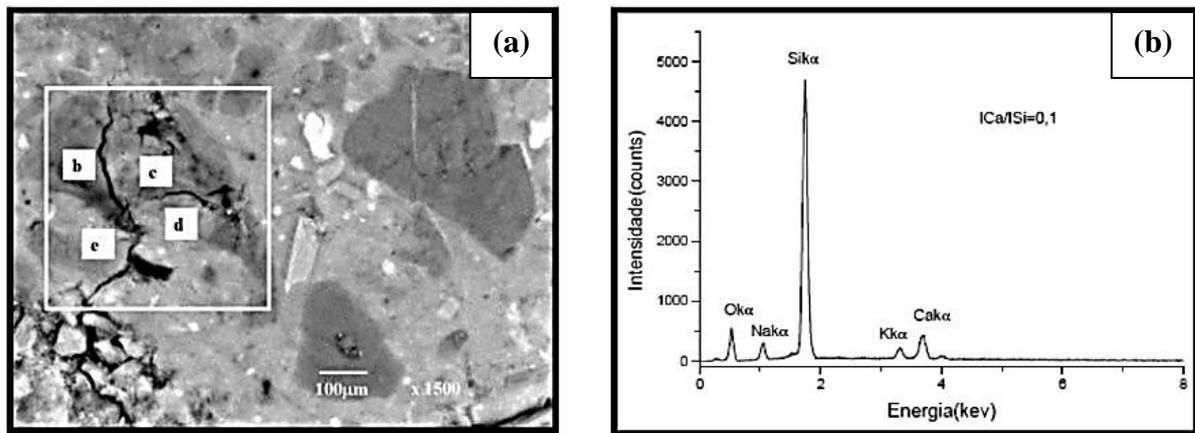
Os autores Hou (2004) e Thomas (2011) revelaram que a RAS é muito parecida às reações pozolânicas, só que ocorrem em fases diferentes: as reações pozolânicas ocorreriam antes da RAS. A principal diferença entre a reação pozolânica e RAS são os produtos resultantes: o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) formado pela reação pozolânica é um gel estável, rígido e resistente, ao passo que o gel da RAS é instável, podendo absorver água e expandir. Nesta reação, ao invés de estar ocorrendo a formação de C-S-H estabilizado estaria se formando outro tipo de C-S-H contaminado por álcalis, sendo este o produto responsável pela manifestação patológica (KNUDSEN, 1975; THAULOW, 1998; DIAMOND, 2000).

Esta afirmação baseia-se principalmente em análises qualitativas realizadas na microestrutura de concretos, as quais demonstram que o gel da RAS apresenta relação cálcio/sílica menor que 1. No entanto, essa relação seria variada para diferentes produtos da RAS, o que se manteria praticamente constante seria o teor de álcalis, porém muito inferior aos teores de cálcio e sílica (BROUXEL, 1993).

A RAS é uma reação deletéria ao concreto que também pode ser causada pelo uso de pozolanas quimicamente ativas ricas em sílica como o caso de cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento. Hasparyk (1999) em seu trabalho analisou comparativamente os produtos da RAA obtidos em amostras contendo adição de sílica ativa e cinza de casca de arroz (CCA) por meio do ensaio da norma americana ASTM C1260 (2014). A autora verificou que a relação cálcio/sílica aumentava e o teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ diminuía com o aumento do teor das adições, sendo que essas barras de argamassa apresentaram redução na expansão.

Diamond (2004) estudando argamassas com teores de sílica ativa e Silveira (2007) estudando com CCA constataram a formação de gel sílico-alcálico, semelhante ao da RAA, em concretos e argamassas constituídos dessas adições, ricas em sílica, as quais estariam atuando como um “agregado reativo” (Figuras 3 e 4). De acordo com os autores, este efeito ocorre por não haver dispersão suficiente do material na matriz cimentícia conforme Figura 17.

Figura 17 – O aspecto e (a) Composição química (b) De um aglomerado de partícula de CCA, formada com produto típico da RAS, indicado pelos pontos a, b, c e d.



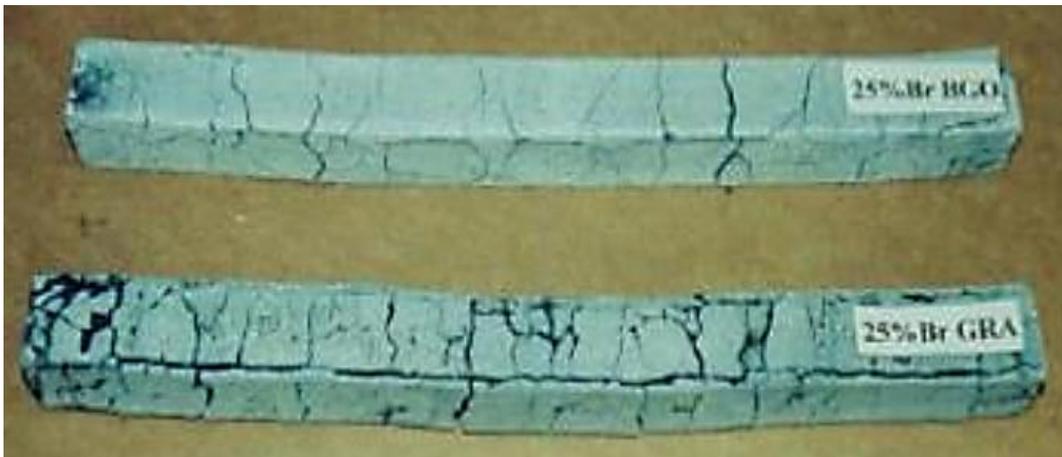
Fonte: SILVEIRA (2007).

Segundo Tibone (2007), altas porcentagens de CCA também podem resultar em fissuração causada pelas reações expansivas do tipo RAS, isto se deve devido a quantidade de sílica disponível na matriz ser muito maior. Hasparyk (1999) relatou em seu estudo que, quando finamente dividida, a CCA é capaz de reagir rapidamente com os álcalis, impedindo ou reduzindo a expansão na argamassa, e conseqüentemente, o seu contato com os minerais reativos presentes nos agregados. Como resultado, uma menor concentração do gel expansivo é formada no contato com os agregados.

Silveira (2007) ainda verificou dois tipos distintos de CCA, com dois tipos de queimas diferentes, uma predominante amorfa e outra com fases cristalinas bem definidas. Os ensaios foram realizados de acordo a ASTM C 1260 (1994) que avalia a expansão em barras de argamassa devido à RAS. Ambas as cinzas aumentaram a expansão nas barras independentemente da origem do agregado empregado. Porém, a combinação do agregado com a cinza mais cristalina apresentou os piores efeitos, em alguns teores provocaram até a degradação dos corpos de prova tendo que ser interrompido o ensaio (Figura 18).

Outro resultado bastante interessante é que tanto a expansão quanto a reatividade pozolânica avaliadas no trabalho aumentaram conforme o aumento da substituição no cimento, exceto a partir do teor de 50 % que para as duas cinzas estudadas apresentou um maior índice de atividade pozolânica e conseqüentemente uma menor expansão. Com base nesses resultados há evidências que o desenvolvimento do produto da RAS ocorre de forma semelhante aos produtos das reações pozolânicas e que se houver a reação pozolânica antes não haverá o desenvolvimento da RAS.

Figura 18 – Aspecto das barras de argamassa confeccionadas com agregado expansivo e 25% de CCA com fases cristalinas ao final do ensaio acelerado

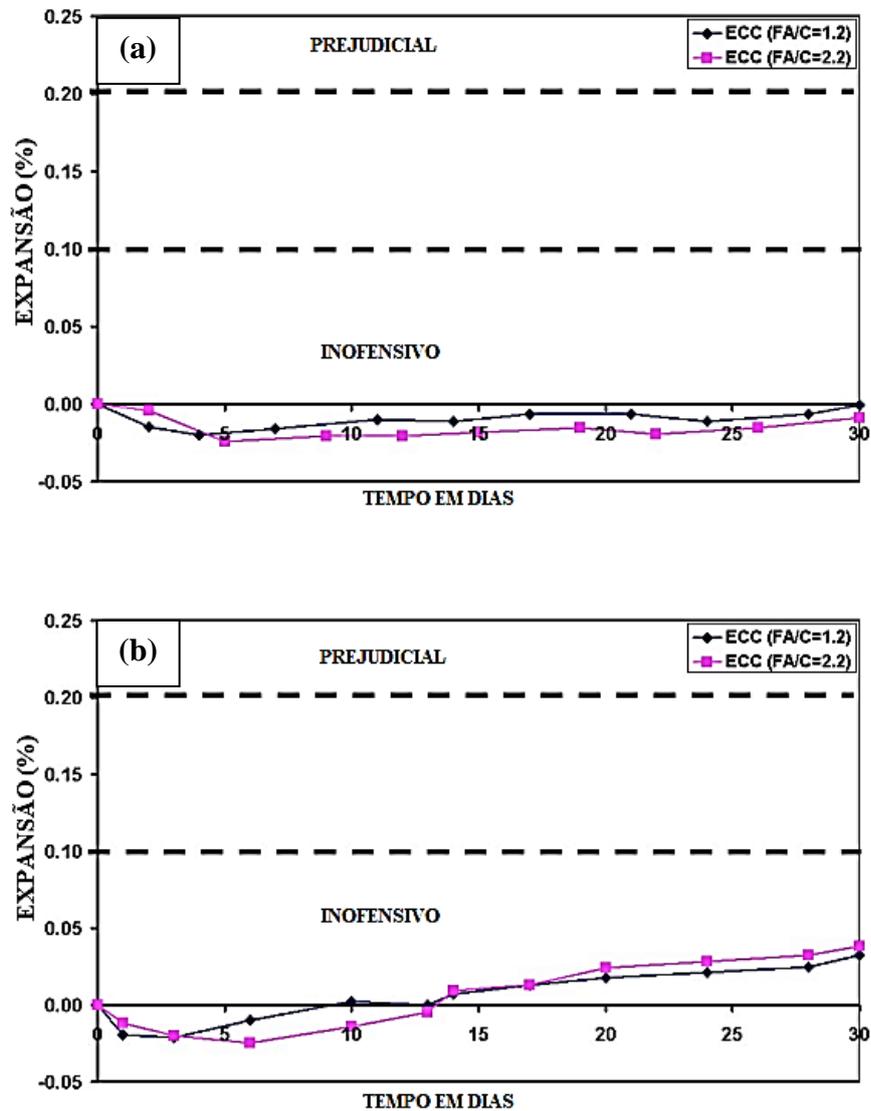


Fonte: SILVEIRA (2007).

Em relação ao ECC, os primeiros estudos sobre a RAS nesse tipo de compósito foram iniciados por Şahmaran e Li (2008). Foram moldadas barras de argamassas de ECC com relações de cinza volante Classe F e Classe C por cimento Portland de 1,2 e de 2,2. As amostras contendo cinzas não apresentaram expansão no final de um período de 30 dias de imersão (Figura 19).

Apesar de ainda utilizarem como agregado miúdo uma areia a base de sílica, a natureza cristalina destas partículas de areia suprimiu a reatividade em ambiente alcalino. Além disso, a presença de um alto volume de cinzas volantes (acima de 50%) diminui o valor de pH devido à reação pozolânica, impedindo a reação RAS de se realizar. E por fim, a presença das microfibras de PVA tende a reduzir qualquer expansão.

Figura 19 – RAS dos ECC (a) Com cinza volante Classe F (b) Com cinza volante Classe C



Fonte: ŞAHMARAN e LI (2008).

2.1.5.3 Carbonatação

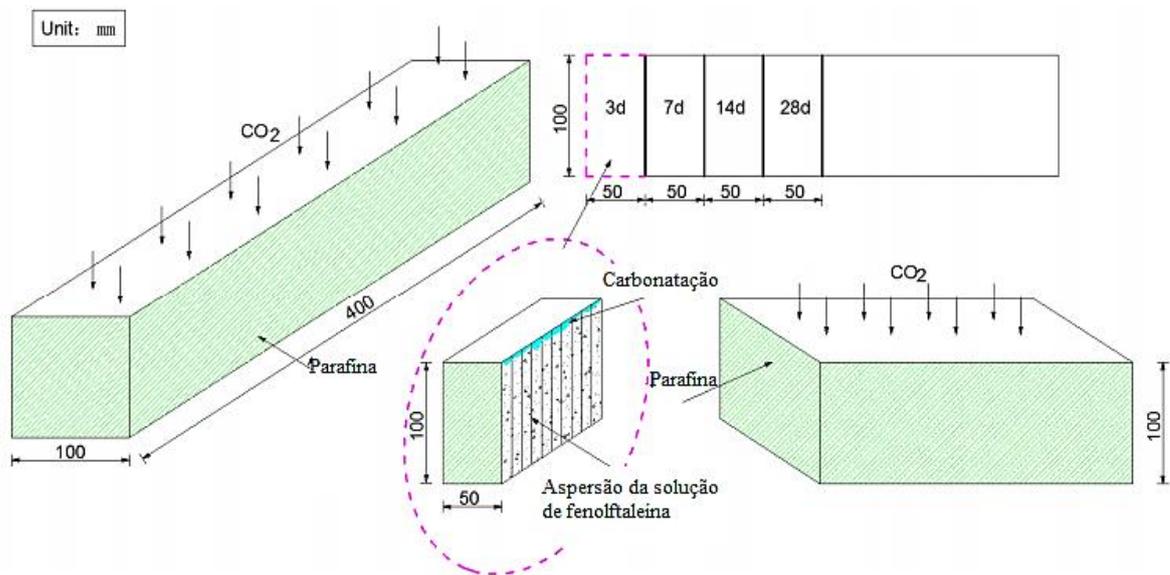
A carbonatação é um fenômeno físico-químico oriundo das reações de gases ácidos do ambiente com os produtos alcalinos do concreto. A alcalinidade do concreto é conferida principalmente pela presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), de sódio (NaOH) e de potássio (KOH), dissolvidos ou precipitados no concreto endurecido (POSSAN, 2004).

Em relação a resistência de carbonatação dos ECCs, o estudo de Zhang *et al.* (2018) verificou a durabilidade de compósitos utilizando fibras de polipropileno e o uso da cinza volante na mistura. Foram moldados corpos de prova nas dimensões de 100 x 100 x 400 mm e após 28 dias de cura, as amostras foram seladas com parafina e apenas uma superfície foi

Influência De Altos Teores De Cinza De Casca De Arroz Nas Propriedades Reológicas, Mecânicas E De Durabilidade Nos Engineered Cementitious Composites (ECC)

deixada exposta. O teste de carbonatação foi realizado numa concentração de CO_2 de $20 \pm 3\%$ em uma câmara de carbonatação aos 3, 7, 14 e 28 dias de exposição. Após esta etapa os corpos de prova foram serrados em uma seção de 50 mm e foram desenhadas linhas para medir a carbonatação a cada 10 mm. Foi utilizada a solução de álcool fenolftaleína (PAS) para medir a profundidade de carbonatação com base na mudança de cor. Os detalhes do teste de carbonatação são mostrados na Figura 20.

Figura 20 – Detalhes do ensaio de carbonatação



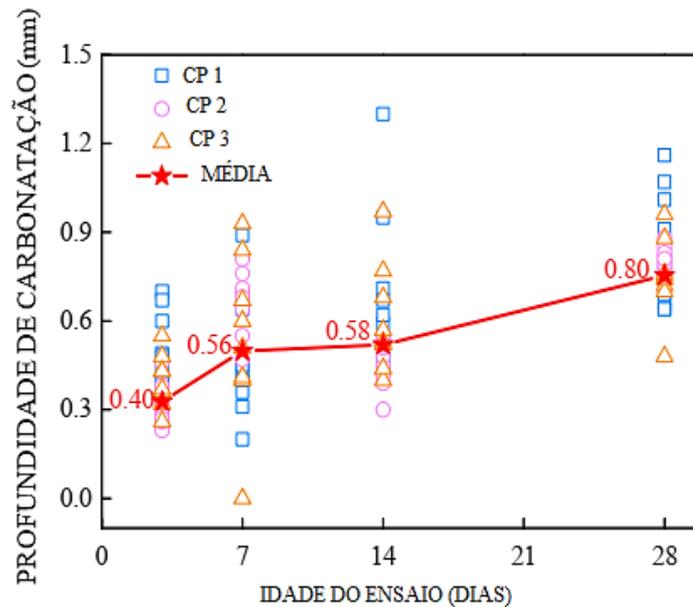
Fonte: ZHANG *et al.* (2018).

Os resultados encontrados por Zhang *et al.* (2018) demonstraram que o *engineered cementitious composites* obteve uma baixa profundidade de carbonatação, que está diretamente ligada à porosidade e a distribuição do tamanho dos poros da matriz endurecida de ECC. Na composição de um traço de ECC não são utilizados agregados graúdos e sim apenas agregados miúdos extremamente finos, a matriz cimentícia do ECC é caracterizada por uma baixa porosidade.

A Figura 21 ilustra os resultados encontrados de carbonatação do ECC com a utilização de fibras de polipropileno. Os pesquisadores demonstraram que uma matriz com baixa porosidade aliada ao uso de fibras pode reduzir a profundidade de carbonatação, pois o ECC quando submetido a esforços de flexão tem uma abertura de fissuras de baixa magnitude. Já concretos convencionais quando submetidos a esforços tende a ter uma única abertura de

fissura com espessura bem maior que a múltipla fissuração do ECC, favorecendo uma alta penetração de CO₂.

Figura 21 – Profundidade de carbonatação do ECC com fibras de polipropileno

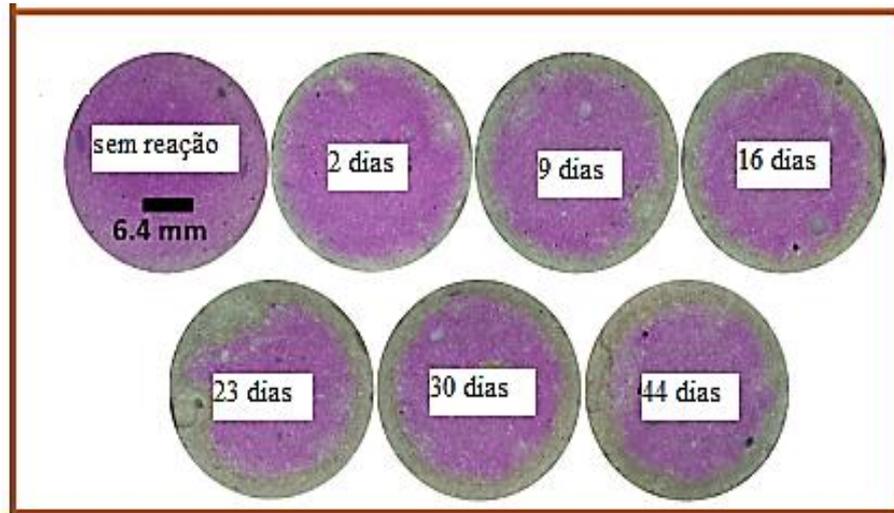


Fonte: ZHANG *et al.* (2018).

Outro estudo sobre carbonatação dos ECCs foi realizado por Adeoye *et al.* (2019). Esta pesquisa verificou a resistência de carbonatação do ECC quando aplicado em tubos de armazenamento de CO₂ em comparação a uma argamassa convencional. O que difere esse estudo do estudo de Zhang *et al.* (2018) é que os corpos de prova ficaram submersos em água com CO₂, sob pressão de 10 MPa dentro de um reator a uma temperatura de 50 ± 1 °C. Esta condição de temperatura e pressão foi escolhida para condições típicas de tubos de concreto para armazenamento de CO₂.

A Figura 22 ilustra a profundidade de carbonatação após 44 dias de exposição, verificada com solução de álcool fenolftaleína (PAS). Os resultados encontrados pelos autores levaram a concluir que o ECC quando aplicado nessas condições de exposição com água acidificada com CO₂ a 50 °C e uma pressão de 10 MPa, resulta em uma profundidade de carbonatação de aproximadamente 7 mm, ou seja, o ECC tem uma vida útil de 50 anos sem que ocorra as primeiras reações.

Figura 22 – Amostras carbonatadas com a aplicação da solução de fenolftaleína (PAS)



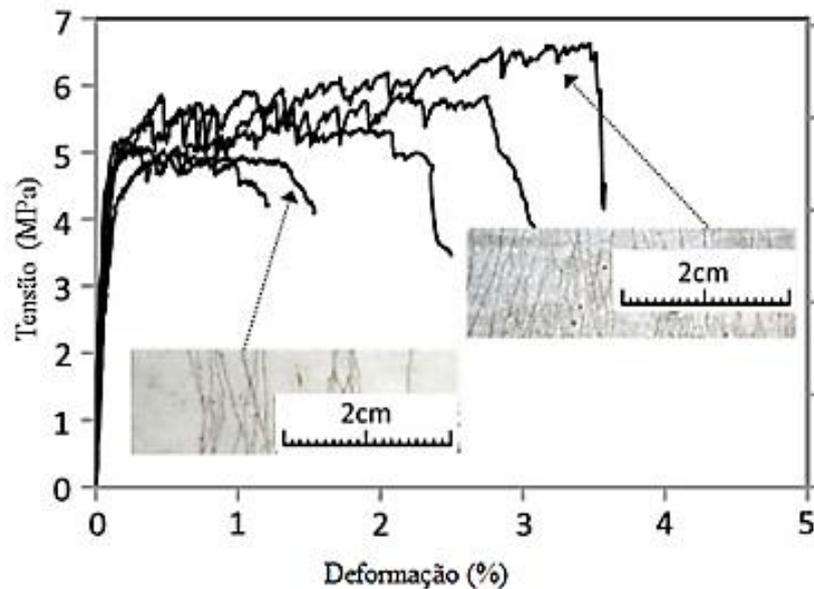
Fonte: ADEOYE *et al.* (2019).

2.1.6 Propriedades Reológicas

No meio acadêmico internacional o uso do ECC está ganhando aplicações em escala real na Europa, no Japão e nos EUA. A capacidade de repetição de produção do ECC com as mesmas propriedades mecânicas é crucial para ganhar aceitação deste novo material de construção em várias aplicações estruturais. Tem sido observada uma variação na produção do ECC quando se passa da pequena escala para uma maior, pois estes fatores dependem do tipo de misturador utilizado, procedimento de mistura, materiais utilizados na dosagem e mão de obra especializada.

A Figura 23 mostra um exemplo de uma variabilidade extremamente grande nas curvas de tensão-deformação de uma mistura de ECC produzida usando um misturador gravitacional com capacidade de 0,6 m³. Apesar da proporção de mistura ser idêntica, os corpos de prova do mesmo lote apresentaram deformações variando de 0,6 a 3,4%. Alguns corpos de prova desenvolveram a múltipla fissuração após a abertura da primeira fissura. Outros atingiram um estágio de suavização de tensão logo após a abertura da primeira fissura levando a uma menor capacidade de deformação. Este exemplo foi escolhido para enfatizar a grande variação potencial do ECC, e ilustrar a necessidade de um controle de qualidade efetivo na metodologia do processamento de ECC para obter propriedades mecânicas otimizadas (LI e LI, 2013).

Figura 23 – Um caso extremo de variação de tração versus deformação do ECC com a mesma proporção de mistura



Fonte: LI e LI (2013).

Uma das hipóteses de variação desses resultados se deve principalmente à influência da reologia durante a fase de produção do ECC. Os ECCs utilizam fibras curtas distribuídas aleatoriamente com uma fração de volume de 2%. Durante a mistura do compósito, as fibras são adicionadas após a mistura dos outros materiais, ou seja, cimento, adições pozolânicas, areia, água e aditivos são misturados até atingirem uma argamassa consistente.

Os detalhes da mistura, como o tipo do misturador, velocidade e tempo de mistura e a experiência da mão de obra podem influenciar nas propriedades reológicas da argamassa do ECC (compósito antes da adição da fibra). Estes detalhes podem afetar fortemente a uniformidade da dispersão das fibras ocasionando uma desconformidade no tamanho dos poros e uma fraca ligação fibra/matriz.

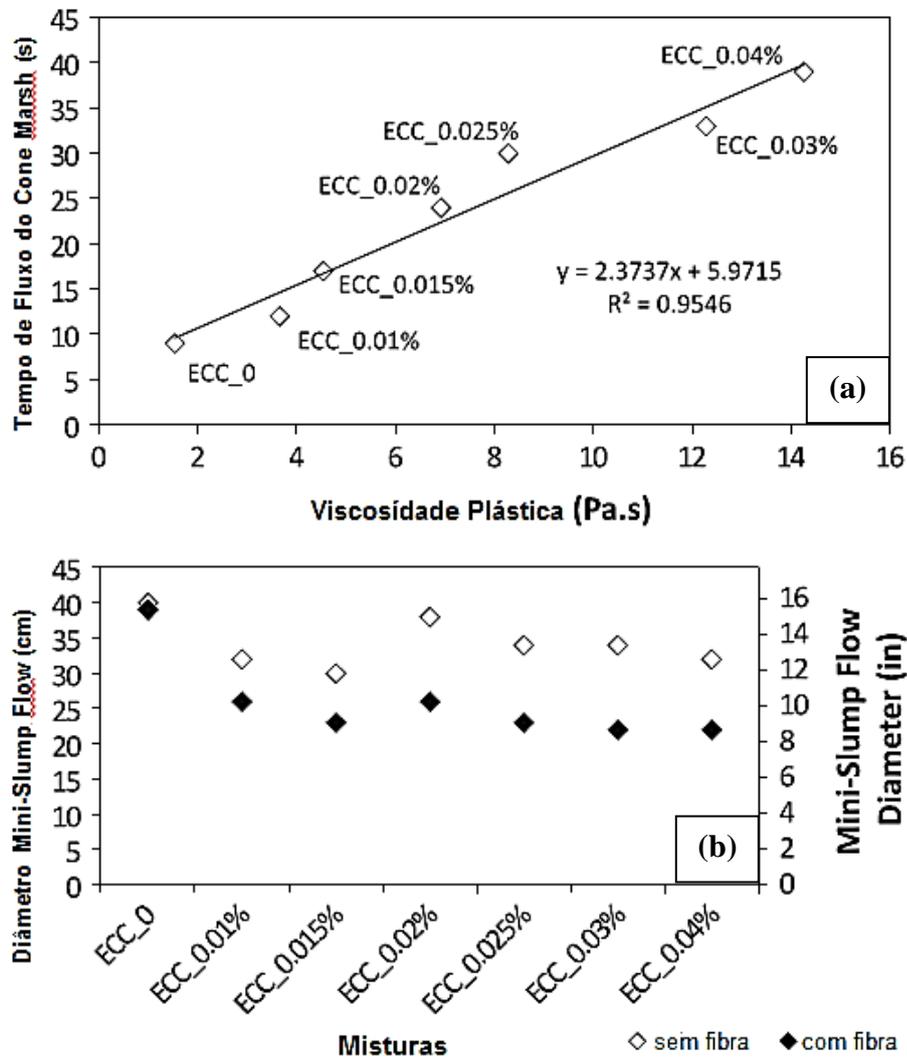
Vários estudos como Bui *et al.* (2003), Kuder *et al.* (2007), Ozyurt *et al.* (2007) e Li e Li (2013) sugerem correlações entre a viscosidade da argamassa e a dispersão das fibras. Também sugerem que haja um controle da viscosidade da argamassa fresca com ajustes na relação água/aglomerante, uso do aditivo superplastificante e adições minerais, para se obter melhores resultados dos ECC no estado endurecido e uma baixa variabilidade nos resultados.

Os autores Li e Li (2013) estabeleceram parâmetros de controle reológico nos ECCs com o uso da fibra de PVA, desenvolvendo uma faixa ótima de viscosidade de argamassa do ECC e uma uniformidade na dispersão das fibras, controlando a reologia desse compósito por

meio dessa faixa ótima de viscosidade. Foram testadas 7 misturas diferentes de ECC variando um modificador de viscosidade. Os ensaios na argamassa do ECC (sem Fibra) foram: viscosidade plástica através de um viscosímetro rotacional, tempo de fluxo pelo Cone de Marsh e trabalhabilidade por meio do *mini-slump*. Já para o ECC já com as fibras dispersas na mistura foram realizados ensaios de *mini-slump* e ensaios mecânicos no estado endurecido.

A Figura 24 indica as propriedades reológicas das sete misturas de ECC. Através da Figura 24a, é possível correlacionar os resultados encontrados no ensaio de tempo de fluxo pelo cone de Marsh com os resultados da viscosidade plástica realizada através de um viscosímetro rotacional. Os autores observaram que à medida que se aumentou a porcentagem do modificador de viscosidade as misturas de argamassas também obtiveram um aumento da viscosidade plástica e do tempo de fluxo. O tempo de fluxo do cone de Marsh aumentou de 9 para 40s devido ao aumento da viscosidade. A mesma tendência foi observada para a viscosidade plástica medida usando o viscosímetro rotacional. Uma forte correlação linear ($R = 0,95$) foi encontrada neste estudo entre o tempo de fluxo do cone de Marsh e a viscosidade plástica, mostrando que o teste de fluxo do cone Marsh deve ser um método indireto confiável para medição de viscosidade laboratorial. Os diâmetros do mini abatimento das 7 misturas antes e depois da adição das fibras podem ser observados conforme Figura 24b. Para uma mesma mistura, adicionando 2% de fibras nota-se que o diâmetro do fluxo de mini abatimento diminuiu proporcionalmente. Estes resultados indicam que, para o intervalo específico de misturas neste estudo, modificando apenas a relação do modificador de viscosidade é possível modificar a viscosidade plástica da argamassa do ECC sem sacrificar as características endurecidas do ECC.

Figura 24 – Propriedades reológicas das sete misturas de ECC (a) Tempo de fluxo do cone Marsh (antes da adição de fibras) versus viscosidade plástica (b) Diâmetro de abertura do mini-slump flow (antes e depois da adição fibras) das sete misturas ECC



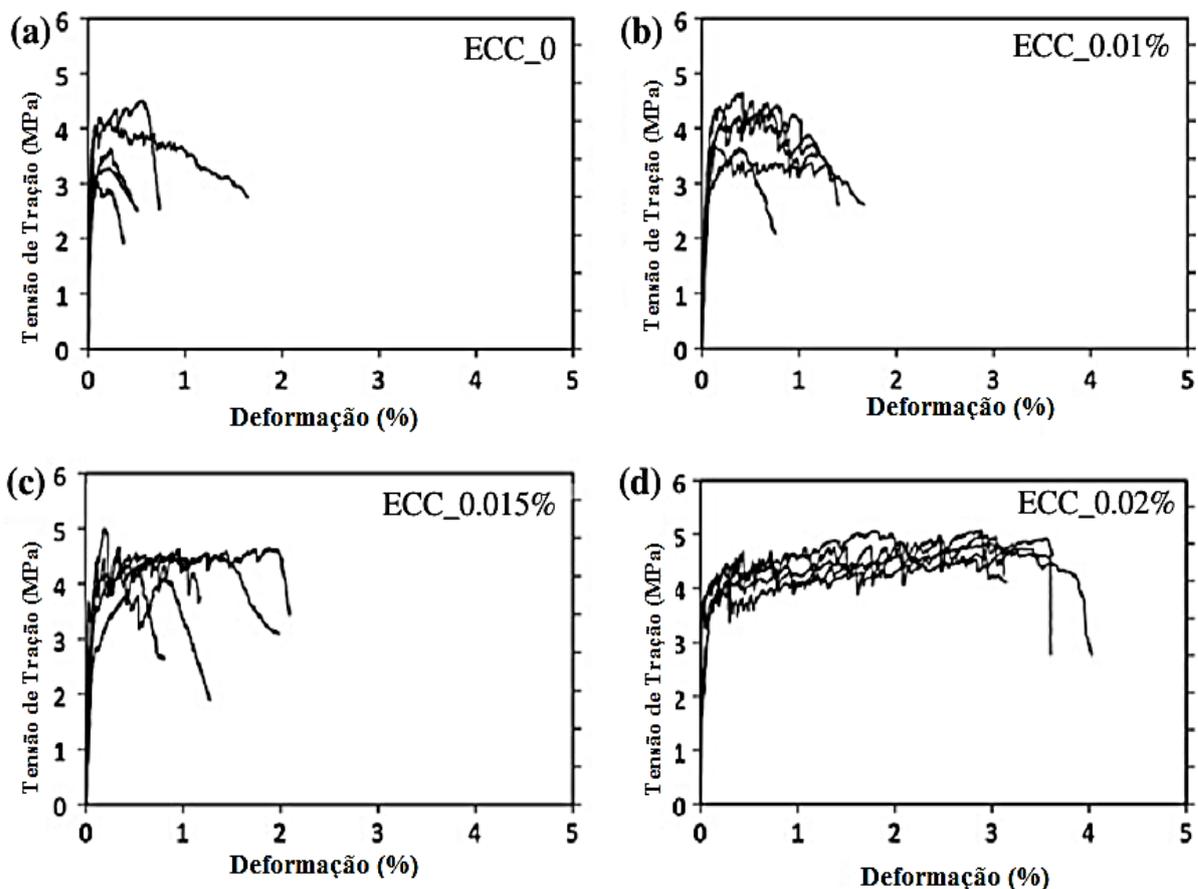
Fonte: LI e LI (2013).

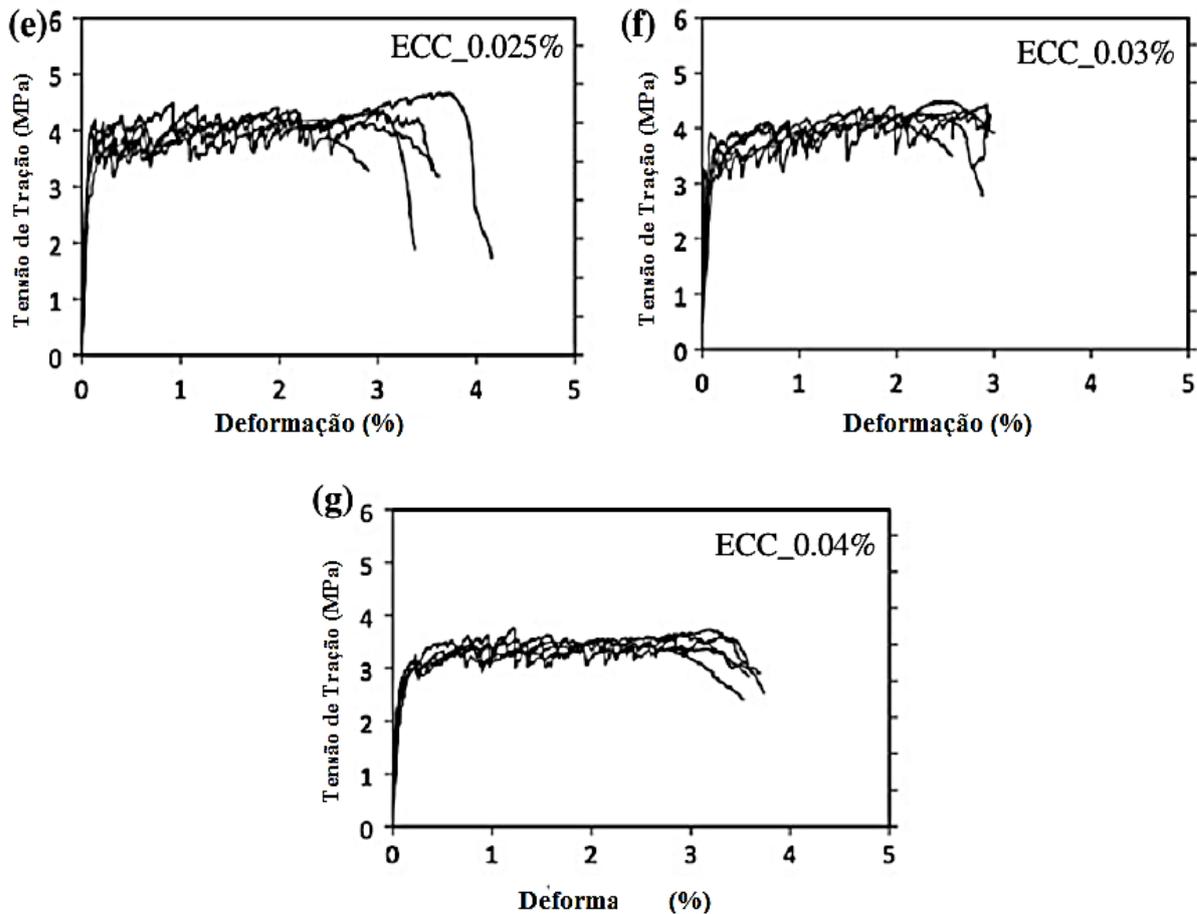
A Figura 29 mostra as curvas de tensão-deformação de tração das sete misturas de ECC do teste de tração uniaxial. Nota-se que apenas para a mistura de ECC_0 houve um leve comportamento de *strain-hardening* com deformações de 0,44%, enquanto as outras amostras mostraram um comportamento de suavização de tensão e um melhor comportamento *strain-hardening* com uma múltipla fissuração mais evidente com maiores ganhos de deformações.

Seguindo nessa mesma linha de estudos sobre o comportamento reológico do ECC, os autores Keskinates e Felekoglu (2018) estudaram seis misturas diferentes de ECC variando a adição pozolânica entre escória de alto e cinza volante. Também foi variada a relação água/aglomerante em 0,31; 0,34 e 0,37. Foram realizados ensaios reológicos na matriz

cimentícia e na mistura do ECC com fibras. Para a matriz foram realizados ensaios em um reômetro para avaliar a viscosidade plástica e para avaliar a trabalhabilidade foi utilizado o ensaio de *mini-slump flow*. Os resultados encontrados pelos autores demonstraram que a reologia da matriz foi melhorada com o aumento da relação água/aglomerante favorecendo o desenvolvimento do comportamento *strain-hardening* e a múltipla fissuração. Os dois trabalhos realizados por Li e Li, (2013) e Keskinates e Felekoglu (2018) utilizaram o modelo reológico de Bingham, por ser o que mais se aproxima para misturas cimentícias.

Figura 25 – Tensão x deformação de 7 misturas de ECC





Fonte: LI e LI (2013).

2.1.7 Modelo Reológico Bingham

O estudo da reologia é um ramo da física que analisa os efeitos provocados em um material através de diversas aplicações de tensões ou deformações, visando compreender as relações entre tensão, deformação, taxa de deformação e tempo. Existe uma preocupação quanto à mecânica de corpos deformáveis que podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso (COSTA, 2006; SCHRAMM, 2006).

A reologia, na prática, tem seu foco em materiais que apresentam propriedades do escoamento mais complexas do que as de um fluido simples (líquido ou gás) ou as de um sólido elástico ideal, apesar de que, dependendo das condições que o ensaio é realizado, o material terá um comportamento simples ou complexo. O concreto no seu estado fresco pode ser considerado um fluido e, por conseguinte, os princípios básicos da reologia podem ser aplicados a este material (CASTRO, 2007).

Em termos de estudo da reologia dos concretos/argamassas pode ser considerado que os agregados são partículas sólidas em suspensão em um líquido viscoso (pasta de cimento e/ou aglomerantes), tornando sua trabalhabilidade dependente das características dos agregados e da matriz cimentícia. Analisando macroscopicamente, o concreto no estado fresco flui como um líquido e para compreender o seu comportamento à deformação nada mais adequado do que buscar os conceitos de reologia considerados adequados para materiais complexos que não se enquadram numa simples classificação de sólido, líquido ou gás (FERRARIS, 1996; TATTERSALL e BANFILL, 1983).

Segundo Nehdi e Rahman (2004) os modelos reológicos independentes do tempo que são os mais utilizados para avaliar a trabalhabilidade de concretos/argamassas – fluidos plásticos (binghamianos), pseudoplásticos e dilatantes – permitem ajustar as variáveis de tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e viscosidade a tendências específicas. A tensão de cisalhamento é difícil de computar quando muda para taxa de cisalhamento zero denominada de tensão de escoamento. Para solucionar isso são aplicados diferentes modelos reológicos capazes de predeterminar estatisticamente a tensão de escoamento.

Através desses mesmos parâmetros é possível estabelecer a viscosidade plástica para uma determinada variação da taxa de cisalhamento. Diversos estudos como Tattersall e Banfill (1983), Hu e Larrard (1996) e Ferraris (1996) concluíram que o concreto/argamassa em termos de propriedades reológicas no estado fresco se comportam como um fluido plástico ou binghamiano, ou seja, a tensão necessária ao escoamento do material – tensão de cisalhamento (τ) – é igual à soma da tensão de escoamento (τ_0) e de outro termo proporcional à taxa de cisalhamento (γ), denominado viscosidade plástica (μ) (Equação 1).

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad \text{Equação 1}$$

Como o concreto fresco é um material heterogêneo, com descontinuidades mecânicas internas extremas, a consideração de um meio contínuo torna-se inaceitável. Assim, os parâmetros reológicos são normalmente medidos como dependentes do equipamento utilizado no ensaio e expressos em unidades de torque, resultando em curvas de cisalhamento onde o torque (T) é apresentado como uma função da velocidade de rotação (N), cuja relação é dada segundo a Equação 2, onde g, torque de escoamento, em [Nm], é a intersecção com o eixo do torque e h, viscosidade de torque, em [Nm.s], é a inclinação da reta. Essas duas constantes são análogas à tensão de escoamento e a viscosidade plástica, respectivamente (YEN *et al*, 1999).

$$\mathbf{T} = \mathbf{g} + \mathbf{h} * \mathbf{N}$$

Equação 2

Castro (2007) ainda complementa que um fluido plástico ou binghamiano em repouso apresenta uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior à tensão de escoamento e se comporta como um sólido elástico rígido. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido newtoniano¹. Quando a tensão de cisalhamento aplicada for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada.

2.2 AVANÇOS DOS ESTUDOS SOBRE ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES NA UFRGS

O Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturas (LEME/UFRGS) consolidou, nos últimos oito anos, um grupo de pesquisa sobre o *Engineered Cementitious Composites* (ECC). O grupo, pioneiro no Brasil, vem aprimorando pesquisas relacionadas à caracterização do compósito, com o emprego de materiais locais, como a areia natural de origem quartzosa, utilizando fibras de polipropileno em conjunto com cinzas volantes ou cinzas da casca de arroz sem controle de queima, visando o desenvolvimento de mixagens viáveis e mais econômicas, adequando o material a realidade brasileira.

O mesmo grupo de pesquisas firmou uma parceria com o Laboratório de Pavimentação da UFRGS nos últimos 4 anos para que as propriedades deste compósito pudessem ser avaliadas na área de pavimentação e uma parceria com a Universidade Federal de Pelotas (UFPEL). A Tabela 1 ilustra todos os trabalhos já realizados por este grupo de pesquisas, quais os seus principais temas de estudo.

¹ Fluidos newtonianos – neste tipo de fluido a viscosidade independe da taxa, uma vez que a tensão de cisalhamento varia linearmente com a taxa de cisalhamento. Alguns exemplos de materiais que apresentam este comportamento são: água, alcoóis, betume, melaço, óleo mineral, entre outros (BETIOLI, 2007).
Influência De Altos Teores De Cinza De Casca De Arroz Nas Propriedades Reológicas, Mecânicas E De Durabilidade Nos Engineered Cementitious Composites (ECC)

Tabela 1 – Levantamento bibliográfico de estudos do ECC no Brasil.

Ano	Autor	Nível	Título	Principais Estudos
2009	Estela Garcez	TESE	Investigação do Comportamento de <i>Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos</i>	Aplicação da viabilidade do uso de fibras de polipropileno e a utilização de cinza volante nos ECC quando dimensionados para overlay de pavimentos
2012	Vitor Perrone	Dissertação não-publicada	Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação tradicionais em pontes	Aprimoramento do Traço de ECC estudado por Garcez e a incorporação de areia fina de origem natural na matriz cimentícia dos compósitos
2012	Édina Q. Casagrande	Trabalho de Conclusão de Curso	Compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante : estudo do desempenho em pavimentos de concreto	Avaliou três métodos diferentes (Perrone (2012); Garcez (2009); ASTM C1399 (2002)) de flexão a quatro pontos para desenvolver qual o melhor método para o ECC; Avaliou o desgaste superficial de abrasão e por fim os primeiros ensaios de trabalhabilidade

2015	Débora Pedroso Righi	Dissertação	Caracterização do Comportamento de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação com a Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz	Estudo pioneiro da incorporação da cinza de casca de arroz sem controle de queima, moída em laboratório na caracterização mecânica destes compósitos garantindo o comportamento <i>strain- hardening</i> e múltipla fissuração
2015	Fernanda B.P. da Costa	Dissertação	Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras	Estudo alinhado ao de Débora, visando o estudo da durabilidade destes compósitos, quando investigados a sua estrutura de poros, corrosão e abrasão. Este estudo também confirmou que o uso da CCA melhora as propriedades de durabilidade deste compósito
2015	Magnon Donin	Trabalho de Conclusão de Curso	Revestimentos de pavimentos : estudo da aderência na aplicação de compósitos cimentícios de alto desempenho para recapeamento	Estudo da aderência entre o ECC e o pavimento asfáltico, utilizando traço sem nenhuma adição pozolânica, segundo estudo focado mais na aplicação do ECC como material de recapeamento

2016	Alceu L. Freitas Júnior	Dissertação	Avaliação da resistência a fadiga dos engineered cementitious composites (ECC), reforçados com fibra de polipropileno e produzidos com adição de cinza de casca de arroz	Este estudo visou os primeiros ensaios de fadiga deste material quando utilizado como camada de recapeamento sobre pavimento rígido de concreto, analisando a reflexão de fissuras sob fadiga do material
2018	Camilo Muñoz Rodríguez	Tese	Comportamento mecânico de um ECC (Engineered Cementitious Composites) com fibra de polipropileno como revestimento de pavimento	Esta tese estudou o comportamento mecânico dos ECCs com e sem fibra como: tração, fadiga, trabalhabilidade. Na segunda fase foi realizada uma pista experimental de pavimentação onde o ECC foi utilizado como recapeamento em pavimentos asfálticos
2018	Vanessa Pasinato	Trabalho de Conclusão de Curso	Avaliação experimental do potencial do ECC (ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES) como reparo de vigas de concreto armado deterioradas pela corrosão de armadura	Este estudo iniciou os primeiros parâmetros do ECC quando utilizado em elementos estruturais, o compósito foi utilizado como um possível material a ser utilizado como reparo em estruturas de concreto armado corroídas.
em andamento (defes	Lucas Guilherme Köhler	Dissertação	Análise da Durabilidade do Engineered Cementitious	Este estudo alinha-se com o trabalho realizado por Fernanda em 2015, onde o diferencial deste trabalho em andamento é

a para 2022)			Composites Pós-fissurado com a Utilização de Cinza de Casca de Arroz e Fibra de Polipropileno	o estudo do ECC fissurado, quais são os aspectos de durabilidade deste material quando o mesmo já sofre tensões e está trabalhando no estado fissurado
2021	Carine Molz	Dissertação	Viabilidade do uso Engineered Cementitious Composites (ECC) como pavimento para tabuleiros metálicos	Este estudo objetiva a aplicação do ECC como pavimento em tabuleiros metálicos, avaliando o comportamento do material em termos de aderência, retração e cura acelerada. O trabalho ainda visa a utilização de aditivos aceleradores de cura e no uso da cinza volante como substituição parcial do cimento.
Em andam ento (defes a para 2022)	Danielle Airão Barros	Tese		Este trabalho visa a continuidade dos estudos que vem sendo desenvolvidos no LEME - UFRGS sobre dosagem de ECC com materiais locais e avaliação da aplicabilidade em sistemas estruturais e pavimentos. A dosagem consiste no uso de areia média (diâmetros máximos 1,2mm e 2,4mm), com substituição total e parcial da areia fina. Também será avaliada misturas com a utilização de GGBFS (Escória de Alto-forno) como adição (em substituição da CCA) e como

elemento de substituição do agregado.

A Tabela 1 serve como base para entender o que já foi estudado sobre o ECC no Brasil e principalmente pelo grupo LEME/UFRGS, quais características já foram estudadas e consagradas dentro do grupo de pesquisa, quais os principais parâmetros encontrados e quais ainda faltam ser estudados, assim podendo compreender quais lacunas de conhecimento ainda precisam ser exploradas. Realizando uma retrospectiva desde o primeiro trabalho estudado sobre o ECC no Brasil é possível perceber qual o maior foco que o grupo de pesquisas tem dado ao ECC dentro da construção civil, assim os próximos itens dividem-se em três grandes áreas, a primeira com o foco do ECC na pavimentação, depois o estudo do próprio material caracterizando apenas o seu comportamento mecânico e de durabilidade e por fim aplicações do ECC em elementos estruturais.

2.3 APLICAÇÃO DO ECC COMO MATERIAL PARA RECAPEAMENTO DE PAVIMENTOS

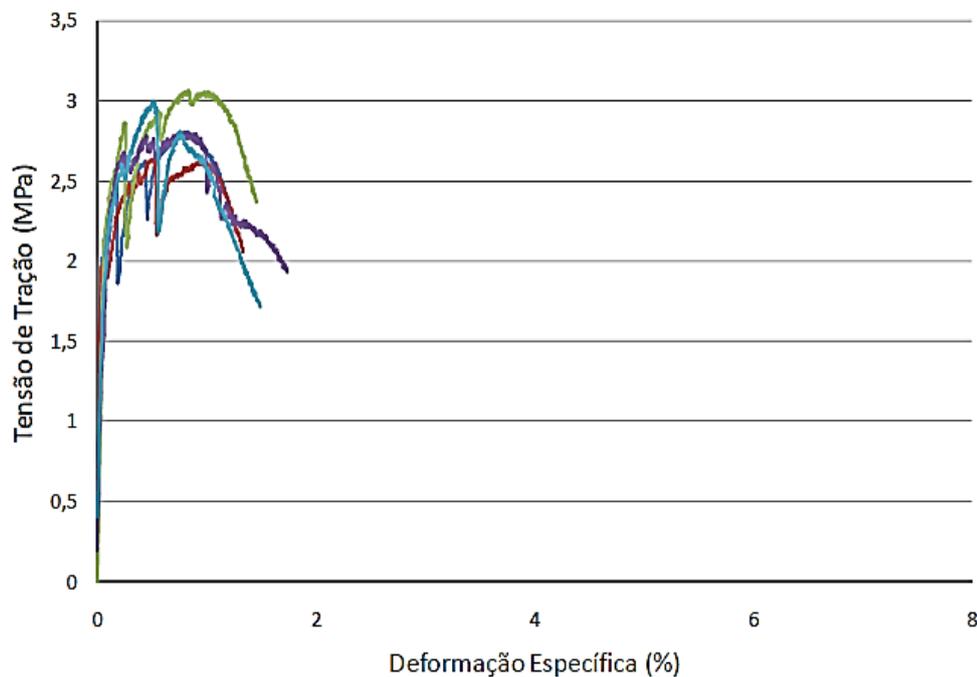
Os estudos do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação no Brasil iniciaram com a tese de doutorado de Garcez em 2009. Em sua tese foi estudado o comportamento destes compósitos com a utilização de fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos. Em suma, os objetivos do trabalho foram verificar o comportamento do compósito à flexão e fadiga, simular camadas de recapeamento de diferentes espessuras, investigar a capacidade do material quanto à fissuração por reflexão e, por fim, uma análise do ciclo de vida, comparando o compósito a concretos e asfaltos, em busca de alternativas de menor custo e interferência ao meio ambiente.

Garcez (2009) proporcionou a consolidação do ECC com o uso de fibras de polipropileno, este estudo se deve à aplicação das fibras de PVA ser inviável no Brasil, uma vez que são produzidas pela empresa Kuraray no Japão, devido ao alto custo de importação e o déficit de quantidade para a aplicação em escala comercial. Garcez (2009) estudou vários traços buscando um traço que melhor se adaptasse aos materiais brasileiros. Foram testados dois tipos de cimento: CP I e CP V, também foi analisada a incorporação de cinza volante nas misturas e variação de proporção de areia. O grande desafio de Garcez (2009) era conseguir o

mesmo comportamento de *strain-hardening* e múltipla fissuração dos ECC produzidos com fibras de PVA, utilizando a fibra de polipropileno.

A Figura 26 demonstra os resultados de tração direta para o traço com cimento CP V, sem adição de cinza volante e proporção de 0,5 de areia, onde é possível perceber que a autora conseguiu desenvolver um ECC com fibra de polipropileno que atendesse as duas características marcantes de um ECC: múltipla-fissuração e comportamento *strain-hardening*.

Figura 26 – Curvas de tensão x deformação de corpos de prova ensaiados a tração direta



Fonte: GARCEZ (2009).

Garcez (2009) verificou que o compósito apresentou resistência à tração média da ordem de 2,87 MPa, capacidade de deformação média de 1,10% e módulo de elasticidade médio de 20,31 GPa. De maneira geral, os compósitos com a utilização de fibras de polipropileno apresentaram um comportamento dúctil através do desenvolvimento de múltiplas fissurações, que atingiram, em média, dimensões de 10 μm , enquanto que, em compósitos com fibras de PVA, a abertura de fissura atinge patamares da ordem de 60 μm .

O modelo de previsão de vida útil gerado para recapeamentos mostrou que o ECC requer camadas 1,5 a 2,5 vezes mais finas que as usuais de concreto. Além disso, apesar do alto custo inicial, recapeamentos de ECCs resultam em uma redução do custo total ao longo de um período de 40 anos considerados pela autora. Por fim os resultados encontrados pela autora demonstram a viabilidade do uso de fibras de polipropileno nos compósitos

cimentícios de elevada capacidade de deformação, o que se tornou uma vantagem para difundir o uso deste compósito no Brasil.

Seguindo a linha de pesquisa sobre o uso do ECC como recapeamento de pavimentos, o trabalho de conclusão de curso da Casagrande (2012), teve como objetivo avaliar ensaios de flexão, desgaste superficial por abrasão e trabalhabilidade do ECC com a utilização de fibras de polipropileno e substituição parcial do cimento por cinza volante. Para análise da flexão o trabalho contou com a utilização de três métodos, no qual todos acarretaram no aparecimento do processo de múltiplas fissurações. Os ensaios de desgaste superficial, realizado pelo método de Liu, apresentaram resultados satisfatórios, resultando em uma perda de massa de apenas 3,15%.

Donin (2015) teve como objetivo do seu trabalho de conclusão de curso, avaliar a aderência entre ECC quando aplicado como recapeamento sobre o pavimento asfáltico. Para determinar a resistência de aderência entre ECC e pavimento asfáltico foi necessário a realização do ensaio de aderência por cisalhamento, pois é fundamental que as camadas trabalhem de forma monolítica reduzindo os esforços de tração que ocorrem no pavimento. Os resultados demonstraram que não houve a necessidade de nenhum tratamento de aderência entre ECC e pavimento asfáltico, apenas a limpeza superficial foi suficiente para gerar resultados satisfatórios em termos de aderência desses dois materiais.

O último trabalho realizado até o momento sobre o uso do ECC como recapeamento na pavimentação foi desenvolvido por Muñoz Rodríguez (2018). Em seu estudo adotou-se o traço de referência sem a utilização de nenhum material pozolânico e também foi utilizado um traço alternativo com 30% (em volume) de cinza de casca de arroz moída por 4 horas, em substituição parcial do cimento. A pesquisa foi dividida em duas abordagens, a primeira consistiu na caracterização das propriedades mecânica dos traços em laboratório com a realização de ensaios de resistência à tração na flexão, à compressão simples, avaliação da aderência por cisalhamento direto e da trabalhabilidade, bem como ensaios de fadiga em viga à quatro pontos.

Muñoz Rodríguez (2018) necessitou avaliar a trabalhabilidade dos compósitos pois seria necessário a produção de uma grande quantidade de compósito para a sua fase 2. Este estudo foi o primeiro a utilizar uma betoneira de tombo e obter os volumes de material necessários. A segunda abordagem da pesquisa consistiu na realização de ensaios em verdadeira grandeza, com a utilização do simulador de tráfego do Laboratório de Pavimentação (LAPAV).

Foram construídos dois recapeamentos (de 50 e 30 mm de espessura) sobre pavimentos flexíveis que apresentavam idêntico padrão de trincamento. Em cada recapeamento foram aplicados 100 mil ciclos da carga de semi-eixo de 5,5 toneladas. Foram acompanhados, visualmente, o surgimento e evolução de fissuras e outras manifestações patológicas, bem como o desgaste superficial, por meio dos ensaios de Pêndulo Britânico e Altura de Mancha de Areia. Após o fim do tráfego, foram serradas placas das seções trafegadas para verificar a propagação das fissuras e a aderência entre o compósito e o pavimento. Como resultados importantes desta tese, a baixa trabalhabilidade nas moldagens iniciais dificultou a mistura, o lançamento e o nivelamento de uma pista de 1m², o que motivou a uma mudança de materiais, alterando o traço desenvolvido inicialmente pelo grupo de pesquisas LEME.

O autor decidiu modificar a granulometria da areia utilizada no traço inicial realizando uma substituição de areia fina por areia média foi de 20%, 50% e 80%, sendo também concretada uma viga com o 100% de areia média para testes de flexão à quatro pontos, os resultados apontam que a proporção de 50% foram com resultados mais satisfatórios. Mesmo estudando essas misturas alternativas, o autor optou por manter o traço padrão já estudado por Garcez (2009).

Para a moldagem das pistas experimentais, o autor realizou mais uma alteração no seu traço, inicialmente utilizou o aditivo superplastificante Glenium 54 da BASF mas acabou optando pelo aditivo Tec-flow 8000 da Grace mantendo a mesma proporção 0,56% vo volume de ECC. A Figura 27 mostra o processo de lançamento do ECC para a construção dos recapeamentos no LAPAV. Foram utilizadas ferramentas convencionais de pedreiro, além de um rastelo metálico para acomodar o material e um vibrador de imersão. Para a produção do ECC (referência) do recapeamento de 50 mm, o primeiro em ser construído, foi utilizada uma betoneira com capacidade de 150 litros. Para sua conformação foram necessários 500 litros de ECC divididos em 13 processos de misturas, misturando um saco de cimento por vez, sendo que em cada mistura foram produzidos aproximadamente 40 litros de ECC.

Já para a construção do recapeamento de 30 mm foi utilizada uma betoneira de 500 litros de capacidade. Os materiais foram dosados para usar em cada processo de mistura 2 sacos de cimento, produzindo aproximadamente 80 litros de ECC (com cinza de casca de arroz) por betonada. Dos 10 metros de comprimento do recapeamento, 7,5 metros foram construídos com ECC (referência) sendo os outros 2,5 metros construídos com o traço alternativo contendo cinza de casca de arroz.

Figura 27 – Processo de lançamento do material na conformação dos recapeamentos



Fonte: MUÑOZ RODRÍGUEZ (2018).

Muñoz Rodríguez (2018) percebeu uma exudação após a vibração do ECC conforme pode ser observado na Figura 28. O autor explica que este fenômeno ocorreu devido ao uso de areia média úmida que foi considerada no traço, ocasionando um excesso de água na dosagem. De maneira geral, o trabalho pode proporcionar resultados importantes para o grupo de pesquisa quando se trata do ECC aplicado em grandes escalas, que é possível produzir grandes volumes de ECC com o uso de uma betoneira de eixo vertical, que é utilizada para concretos convencionais, independentemente do seu volume. Também é possível observar que é necessário utilizar materiais secos ou corrigir a relação água/aglomerante conforme o teor de umidade do agregado miúdo.

Figura 28 – Exsudação observada na construção do recapeamento de 50 mm



Fonte: MUÑOZ RODRÍGUEZ (2018).

2.4 ESTUDO DO ECC COM A UTILIZAÇÃO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ EM TERMOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E DURABILIDADE

Dando seguimento aos estudos iniciados por Garcez (2009), uma dissertação de mestrado (não publicada) de autoria de Vitor Perrone no ano de 2012, tinha como foco principal o uso de materiais brasileiros, o grande destaque deste estudo foi a utilização de uma areia de origem natural fina na matriz cimentícia destes compósitos, em estudos anteriores eram utilizadas apenas areias normatizadas. Este estudo proporcionou um grande avanço do grupo de pesquisa na caracterização dos compósitos com materiais locais.

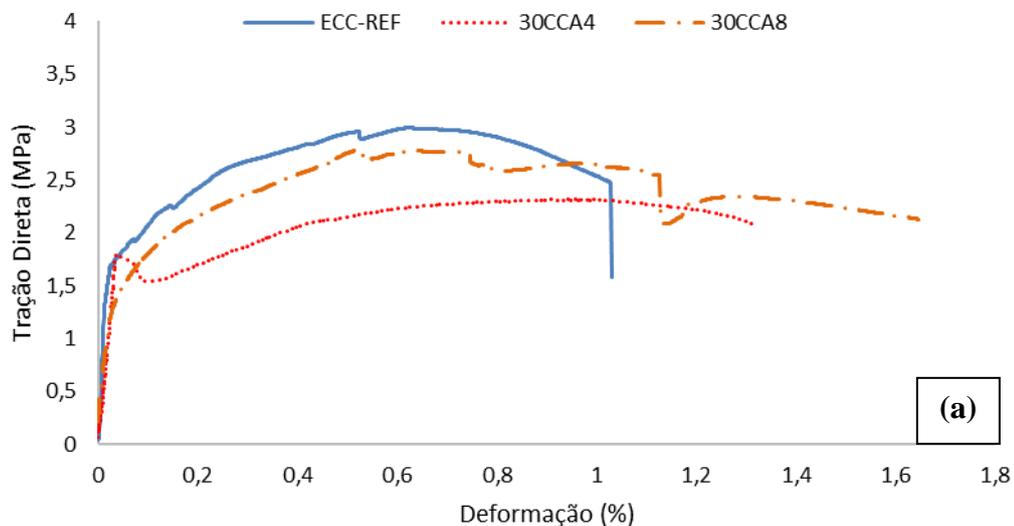
Com esses dois trabalhos o grupo de pesquisas LEME avançou seus estudos do ECC com o uso de fibra de polipropileno e areia fina de origem natural. Sabe-se que este tipo de compósito necessita em sua matriz cimentícia um consumo de cimento normalmente duas ou três vezes mais que a utilizada em concretos convencionais o que torna seu custo mais elevado. Buscando diminuir este consumo elevado de cimento duas novas dissertações tiveram como foco o uso de cinza de casca de arroz em substituição ao cimento.

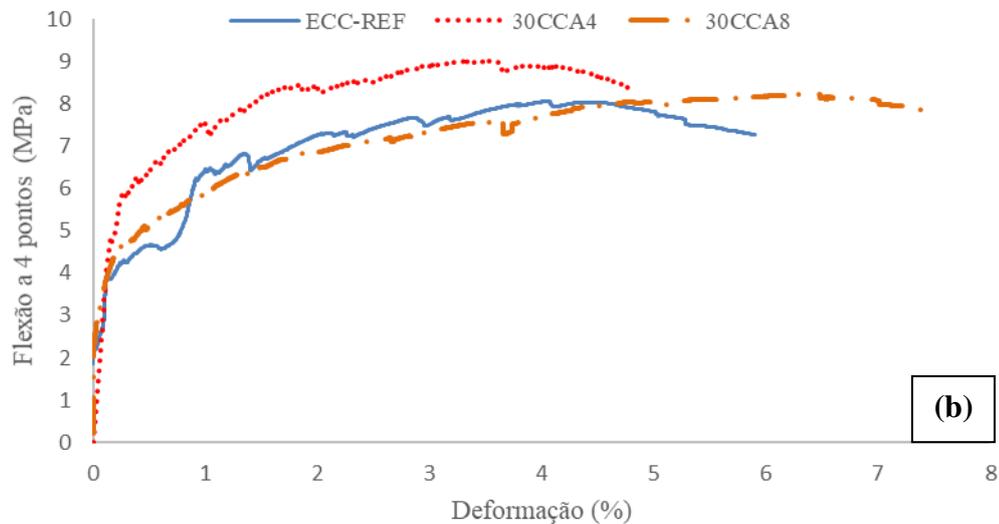
Righi (2015) teve seu foco no estudo da caracterização do comportamento mecânico destes compósitos, mostrando a eficácia da utilização de materiais cimentícios suplementares, como a cinza de casca de arroz (CCA) sem controle de queima, moída em laboratório em substituição do cimento. Neste estudo foi realizada misturas com 10%, 20% e 30% de CCA

em substituição ao cimento, com CCA moídas em laboratório nos tempos de 1 hora, 2 horas, 4 horas, 6 horas e 8 horas.

Os ECCs com o uso de cinza de casca de arroz sem controle de queima na porcentagem de 30% com tempos de moagem de 4 e 8 horas e fibras de polipropileno se constituem de uma alternativa promissora para ser utilizado no Brasil. A Figura 29 mostra a curva tensão-deformação dos compósitos sob tração direta (Figura 29a) e flexão a quatro pontos (Figura 29b), no qual o compósito com cinza de casca de arroz com 30% CCA moída por 8 horas (30CCA8) mostrou uma capacidade de 1,2% na tração e mais de 6% na flexão. Em contrapartida, o compósito de referência (ECC-REF) apresentou apenas 0,8% e 5,5%, respectivamente. O compósito com cinza de casca de arroz com 30% CCA moída por 4 horas (30CCA4) se tornou uma possibilidade viável entre o traço referência e o moído por 8 horas.

Figura 29 – Curva tensão x deformação dos compósitos sob (a) Tração direta (b) Flexão a quatro pontos





Fonte: Adaptado de RIGHI (2015).

Pereira da Costa (2015) desenvolveu em paralelo ao de Righi (2015) uma análise da durabilidade e alguns processos deteriorativos que podem afetar os *Engineered Cementitious Composites* com a utilização de fibras de polipropileno e cinza da casca de arroz. Esta dissertação visou analisar questões de durabilidade destes compósitos (com e sem a incorporação de cinza), e compará-los a concretos convencionais, através de ensaios relacionados ao estudo da estrutura de poros (absortividade, absorção e índice de vazios, absorção e água por capilaridade, absorção de água pelo método do cachimbo e microscopia eletrônica de varredura), penetração e difusão de íons cloretos, retração livre e restringida, e, por fim, resistência à abrasão.

Os resultados encontrados por Pereira da Costa (2015) indicam que a incorporação de cinza de casca de arroz melhorou significativamente as propriedades do compósito relacionadas à conexão e solução dos poros, dificultando a passagem de cloretos, além de apresentar resistência à abrasão semelhante ao compósito de referência.

Atualmente está em desenvolvimento a dissertação de Köhler com previsão de defesa para 2020, onde o autor visa repetir os ensaios realizados por Pereira da Costa (2015) em ECC pós-fissurados para compreender o quanto o estado de múltipla fissuração pode influenciar em termos de durabilidade. O autor também investigará porcentagens maiores de cinza de casca de arroz na matriz cimentícia dos compósitos.

2.5 ECC APLICADO EM ESTRUTURAS

O trabalho de Pasinatto (2018) foi o primeiro trabalho do grupo de pesquisas LEME com foco do ECC voltado para estruturas de concreto armado. O trabalho visou à utilização do ECC como reparo em vigas de concreto armado convencional, deterioradas pelo método de corrosão acelerada CAIM no intuito de analisar o comportamento mecânico deste elemento de concreto armado e ECC. A autora adotou como estratégia a verificação de três tipos de sistemas: viga referência, viga submetida a um processo de corrosão de armaduras e viga submetida a um processo de corrosão de armaduras posteriormente reparada com ECC. Outro ponto importante nesse trabalho de conclusão de curso de Pasinatto (2018) é a porcentagem de 50% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, onde ensaios mecânicos e de durabilidade indicaram que o aumento da porcentagem de 30% para 50% melhorou o comportamento *strain-hardening* e o processo de múltipla fissuração. A autora percebeu a dificuldade de realizar o reparo nas vigas com o ECC e foi necessário realizar um esquema de montagem de fôrmas para que o preenchimento com ECC fosse realizado. A Figura 30 ilustra as vigas após o ensaio de corrosão. Na Figura 30a, com a remoção do concreto e pronta para receber o reparo com ECC, e na Figura 30b, com o esquema de fôrmas criado para o reparo com ECC.

Figura 30 – Vigas após o ensaio de corrosão (a) Com remoção do concreto e pronta para receber o reparo com ECC e (b) Com o esquema de fôrmas criado para o reparo com ECC (Figura 30b)



Fonte: PASINATTO (2018).

Pasinatto (2018) constatou a dificuldade de realizar o reparo com ECC devido a falta de trabalhabilidade. Ensaios preliminares do grupo de pesquisas LEME não conseguiu que o ECC fosse lançado na estrutura e ficasse pela própria força de lançamento, como é comumente utilizado com argamassas de reparo, por isso foi necessário realizar um esquema de fôrmas para que a concretagem do ECC pudesse ser realizada. A Figura 31 ilustra os três tipos distintos de vigas ensaiadas, viga referência (Figura 31a), viga submetida ao ensaio de corrosão (Figura 31b) e viga submetida ao ensaio de corrosão e reparada com ECC (Figura 31c).

Figura 31 – Corpos de prova após ensaio de flexão (a) viga de concreto armado sem corrosão; (b) viga de concreto armado após corrosão e (c) viga de concreto armado após corrosão reparada com ECC



Fonte: PASINATTO (2018).

Outro ponto observado no trabalho de Pasinatto (2018) que após o reparo com ECC a viga foi submetida ao ensaio de flexão a quatro pontos e foi possível observar que o concreto atingiu sua resistência características e causou o esmagamento do concreto. Também foi possível perceber que não houve descolamento do ECC com o concreto, apresentando um comportamento positivo quanto à aderência entre sistema de reparo e substrato de concreto, e não prejudicou a resistência mecânica das vigas mantendo a carga de ruptura das mesmas. Por se tratar de ensaios iniciais na área de estruturas de construção civil, os resultados de Pasinatto

(2018) precisar serem melhores aprofundados, aumentando variáveis de estudos e um grupo de amostragem maior para que alguns pontos possam serem melhores confirmados.

2.6 ECC UFRGS: PRINCIPAIS AVANÇOS, CONTRIBUIÇÕES E NECESSIDADES DE AVALIAÇÃO

Este item aborda os principais avanços no estudo do comportamento mecânico e de durabilidade do ECC, quais as principais variáveis que já foram consagradas pelo grupo de pesquisa LEME/UFRGS, quais variáveis necessitam ainda de estudos aprimorados, juntamente com trabalhos já realizados por outras Universidades referente ao estudo do ECC. A Tabela 2 ilustra o ano das pesquisas estudadas, juntamente com a linha de pesquisa, pontos positivos e os que necessitam serem melhores estudados.

Tabela 2 – Levantamento bibliográfico do que já foi estudado em ECC e o que precisa ser melhor estudado

ANO	LINHA DE PESQUISA	VARIÁVEIS ESTUDADAS	PONTOS POSITIVOS DOS ESTUDOS ANTERIORES	PONTOS QUE PRECISAM ESTUDOS MAIS APROFUNDADOS	RESUMO DAS VARIÁVEIS QUE NECESSITAM ESTUDO
2009	PAVIMENTAÇÃO	USO DA FIBRA DE POLIPROPILENO	A substituição da fibra de PVA por fibra de polipropileno manteve as características principais do ECC	*	*
2012	PAVIMENTAÇÃO	USO DE AREIA FINA NATURAL	A viabilidade do uso de uma areia fina natural ao invés de uma areia industrializada proporcionou a viabilidade do ECC no Brasil	*	*
2012	PAVIMENTAÇÃO	ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS	Dentre 3 tipos distintos de ensaios de flexão a 4 pontos, o Método do Perrone apresentou melhor desempenho	Este ensaio ainda necessita de algumas adaptações, devido a uma pequena perda de medidas de deslocamento da flecha, devido a grande deformação	Melhora do protótipo do ensaio de flexão a 4 pontos
2014(#)	ESTUDO DO MATERIAL	USO DE MATERIAIS POZOLÂNICOS	Adição de CCA com e sem controle de queima e cinza volante	Estudos de maiores porcentagens de CCA na matriz cimentícia, como substituição ao cimento Portland	CCA com e sem controle de queima

2015	ESTUDO DO MATERIAL	USO DA CINZA DE CASCA DE ARROZ	A troca da cinza volante por cinza de casca de arroz proporcionou uma melhora na tenacidade da matriz cimentícia do ECC, o tempo de moagem ideal foi resolvido em 2015, onde a moagem de 8 horas é a mais promissora	Estudos de maiores porcentagens (acima de 30%) de CCA na matriz cimentícia, para deixar mais viável economicamente	Porcentagens (%) maiores de CCA
2015	ESTUDO DO MATERIAL	ENSAIOS DE DURABILIDADE	Estrutura de poros, resistência à abrasão, ataque por íons cloretos foram os primeiros ensaios de durabilidade do ECC com materiais brasileiros. Foi definido que o uso da CCA é primordial para a melhorar da durabilidade do ECC	Até o momento nenhum estudo publicado do ECC brasileiro aborda questões de durabilidade do ECC pós-fissurado, onde o comportamento de múltipla fissuração já é visível, como os mecanismos de durabilidade são afetados com essa múltipla fissuração	Durabilidade do ECC pós-fissurado
2015	PAVIMENTAÇÃO	ADERÊNCIA DO ECC AO PAVIMENTO ASFÁLTICO	Ensaio de aderência demonstraram que o ECC é aplicável como recapeamento de pavimento asfáltico	Precisa estudar melhor a interface ECC/pavimento, como essa união necessita ou não de um tratamento superficial para aumento da ponte de aderência	Ensaio de Aderência ECC/ Pavimento existente
2016(#)	ESTUDO DO MATERIAL	AREIA NATURAL E SÍLICA ATIVA ≠ PORCENTAGENS DE FIBRA	Estudo do comportamento mecânico dos ECCs com o uso da sílica ativa na matriz cimentícia em diferentes porcentagens	Porcentagens menores de sílica ativa e a fixação de 2% de fibra de polipropileno	Sílica ativa e ≠ porcentagens de fibra

2018(#)	ESTUDO DO MATERIAL	REOLOGIA DO ECC COM FIBRA DE PVA	Estudo de parâmetros reológicos e dispersão da fibra na matriz ECC	A dispersão das fibras e diferentes tipos de reômetros afetam as propriedades reológicas e comportamento mecânico	
2018	PAVIMENTAÇÃO	USO DO ECC EM PISTA EXPERIMENTAL	A dosagem do ECC para uma pista experimental necessitou uma adaptação do traço para que a trabalhabilidade não fosse um fator negativo do material	Necessidade de adaptações do traço para melhorar a trabalhabilidade para elementos maiores	Refinamento no traço em termos de trabalhabilidade (Reologia)
2018	PAVIMENTAÇÃO	CONCRETAGEM EM DIFERENTES BETONEIRAS	A adaptação do traço para betoneiras de volumes distintos proporcionou entender sobre a dispersão das fibras	Ainda é necessário descobrir a melhor forma para a dispersão das fibras durante a concretagem, evitando grunhos de fibras	Estudo da variabilidade da dispersão das fibras
2018	ELEMENTOS ESTRUTURAIS	USO DO ECC COMO REPARO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS	O uso do ECC como reparo em vigas de concreto armado corroídas proporcionou primeiros avanços deste material quando utilizado em elementos estruturais	O processo de reparo ainda é essencial ser estudado, novamente o traço necessita de uma adaptação para melhorar a trabalhabilidade. Outro ponto é estudo do lançamento do ECC para reparo em elementos estruturais, energia de lançamento, aderência e fixação em peças estruturais	Lançamento do ECC quando utilizado como reparo estrutural
em aberto	ELEMENTOS ESTRUTURAIS	ESTUDO DO ECC COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	**	Dimensionamento do ECC como elemento estrutural nas edificações, com as propriedades do ECC é possível já prever para dimensionar peças estruturais onde há esforços de tração com este material.	Modelos matemáticos

em aberto	ELEMENTOS ESTRUTURAIIS	MODELAGEM DO ECC COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	**	Estudo para a obtenção de modelos matemáticos sobre o comportamento mecânico do ECC quando aplicado em elementos de concreto armado	Estudo de Modelagem Matemática
em aberto	ESTUDO DO MATERIAL	ESTUDO DE ACV DO ECC EM DIFERENTES APLICAÇÕES	**	Estudo da análise do ciclo de vida do ECC brasileiro quando aplicado a diversas aplicações, um estudo de ACV se faz necessário	ACV do ECC
em aberto	ESTUDO DO MATERIAL	<i>SELF-HEALING</i>	**	Estudo sobre a auto-cicatrização dos ECC	<i>Self-healing</i>

* Variáveis já consagradas

** Variáveis ainda não estudadas

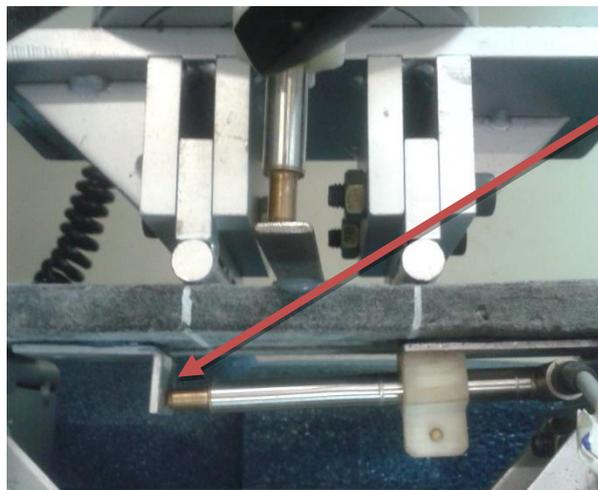
(#) Estudos em Outras Universidades Federais no Brasil

Conforme a Tabela 2, a primeira variável que foi estudada foi o uso da fibra de polipropileno em substituição a fibra de PVA e os resultados foram muito promissores, viabilizando os estudos do ECC no Brasil, por causa da fibra de polipropileno ser produzida em grande quantidade, apresenta menor densidade, possui uma maior alongação até a ruptura e, também, uma resistência química mais elevada. Outra variável que facilitou a difundir os estudos do ECC foi a substituição da areia artificial de sílica pela areia fina natural de origem quartzosa.

Após a inserção desses dois materiais no traço original do ECC, foi necessário realizar estudos para compreender qual ensaio conseguiria medir o comportamento de *strain-hardening* e a múltipla fissuração. Foi necessário desenvolver novos métodos para medir a resistência a flexão a quatro pontos, o método desenvolvido por Perrone (2012 – não publicado) apresentou os melhores resultados, evidenciando o comportamento *strain-hardening* e a múltipla-fissuração, comportamento primordial para ser caracterizado como um ECC. O método de Perrone ainda necessita de algumas adaptações pois o ensaio ainda gera uma pequena diferença de leitura dos LVDTs devido a grande deformação do corpo de prova.

A Figura 32 ilustra o ensaio sendo realizado e é possível perceber o posicionamento do LVDT na horizontal ao corpo-de-prova. Quando corpo-de-prova é flexionado, o LVDT faz leituras de deslocamento até que atingisse o comprimento máximo do LVDT ou em outras situações, o deslocamento do LVDT com a curvatura do corpo-de-prova ocasionando ter que parar o ensaio devido à falta de leituras.

Figura 32 – Ensaio de flexão a quatro pontos ilustrando a perda de medidas pelo LVDT



Fonte: Autoria Própria.

A utilização da cinza de casca de arroz (CCA) na matriz cimentícia do ECC, substituindo o cimento, gerou resultados promissores. O primeiro trabalho que foi desenvolvido na incorporação da CCA foi na Universidade Federal de Pelotas em parceria com a UFRGS, onde foi avaliado a influência do controle ou não de queima da CCA quando incorporada ao ECC.

A escolha desse tipo de resíduo se deu por dois pontos: o primeiro sobre a grande abundância do resíduo no Rio Grande do Sul e segundo por possuir atividade pozolânica já estudada. Para a produção dos ECCs é necessário o uso de uma pozolana na matriz cimentícia para que não haja um grampeamento exagerado das fibras, não proporcionando a transferência de esforços entre a matriz e a fibra. Em termos de comportamento mecânico, o uso da cinza de casca de arroz obteve resultados com melhores desempenhos.

Os primeiros estudos de durabilidade do ECC com cinza de casca de arroz demonstraram que o uso deste material pozolânico melhora as propriedades do ECC, toda a análise da estrutura de poros do ECC com CCA quando comparado ao ECC referência (só com cimento CP V) obteve resultados melhores, indicando que para um traço de ECC brasileiro, a cinza de casca de arroz se torna um componente indispensável. Em termos de penetração de íons cloretos também pode-se perceber que a cinza de casca de arroz diminui drasticamente o grau de penetração de cloretos, novamente confirmando a importância do uso deste material.

Uma lacuna que ainda não foi preenchida, é a durabilidade do ECC quando o mesmo encontra-se no estado de múltipla fissuração. Cabe lembrar que o ECC é dimensionado para trabalhar no estado fissurado, os primeiros estudos de durabilidade do ECC brasileiro foram realizados em corpos de provas íntegros, ainda não se sabe o quanto a múltipla fissuração pode influenciar em termos de durabilidade deste material. Uma dissertação iniciou os estudos para preencher essa lacuna, com previsão de defesa para 2022.

Um outro ponto de análise da durabilidade é o estudo de auto-cicatrização do ECC, conhecido pelo comportamento *self-healing*, sabe-se que o ECC desenvolvido por Victor Li (2003) possui essa característica de regenerar as fissuras devido a processos de secagem e molhagem, esta variável ainda encontra-se aberta no ECC brasileiro, é necessário realizar estudos para que se possa compreender se os materiais constituintes do traço brasileiro também possibilita o desenvolvimento desse comportamento.

No ano de 2016, a Universidade Estadual de Maringá, estudou a incorporação de sílica ativa no ECC, e variando porcentagens de fibras, quando aplicado a recapeamento de pavimentos, conforme Oliveira (2016). O autor concluiu que porcentagens altas de sílica ativa

da ordem de 50% perde-se desempenho mecânico e que é necessário o uso de 2% de fibras para que o comportamento *strain-hardening* se desenvolva.

Quando o ECC tem a aplicação como recapeamento de pavimentos, várias análises já puderam ser realizadas, como estudo da aderência entre o ECC e o pavimento asfáltico, que chegou a conclusão que não há necessidade de um material alternativo para criar uma ponte de aderência entre esses materiais. Mas em contrapartida o ensaio ainda necessita de algumas adaptações para que realmente possa-se compreender a aderência entre esses materiais diferentes do estado de conservação de um pavimento asfáltico.

Quando o ECC brasileiro foi utilizado para pistas experimentais de pavimentação foi possível perceber a grande dificuldade de moldagem, a falta de trabalhabilidade levou a necessidade das primeiras adaptações ao traço, que até então não havia sofrido nenhuma adaptação. Estes primeiros estudos que reforçam a linha de pesquisa que será desenvolvida nessa tese, que é compreender melhor o comportamento reológico do ECC e refinar o traço para que se possa iniciar estudos sobre a potencialidade dele em diferentes aplicações na construção civil.

O ECC sendo aplicado em pistas experimentais também proporcionou compreender que o uso de uma argamassadeira de 5 litros, uma betoneira de eixo vertical ou uma betoneira de eixo inclinado não influenciava na hora da moldagem, pois o ECC conseguia ser rodado naturalmente mas influenciava a dispersão das fibras na hora da mistura, por isso essa lacuna ainda precisa ser melhor estudada. É necessário criar métodos de dispersão das fibras para que se evite um acúmulo exagerado de fibras, criando grunhos e pontos de concentrações de tensões. Acredita-se que esse refinamento no traço, melhorando a trabalhabilidade possa vir a contribuir para essa variável e assim sanando a dificuldade de dispersão.

O primeiro trabalho realizado no Brasil sobre a reologia do ECC com fibra de PVA foi realizado pela autora Santos de França (2018) na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em um doutorado sanduíche com a Technical University of Munich (TUM) na Alemanha. A autora investigou o comportamento reológico em diferentes reômetros e diferentes etapas de misturas para que a dispersão das fibras fosse solucionada. Este trabalho servirá de base para esta tese, visto que mesmo utilizando uma fibra diferente, será possível correlacionar com o ECC brasileiro.

Os primeiros estudos do ECC brasileiro aplicado em elementos estruturais também encontraram dificuldades na moldagem e trabalhabilidade, não foi possível realizar o lançamento do ECC quando aplicado como reparo na estrutura, como normalmente é utilizado com outros tipos de reparos. Foi detectado que devido ao peso do ECC, o mesmo

não tinha aderência suficiente quando lançado na estrutura devido a gravidade, e foi necessário criar um esquema de fôrmas para que se fosse moldado o ECC na estrutura. Também foi possível perceber que por este método adaptado de moldagem não houve uma união perfeita entre o concreto antigo e o ECC evidenciando novamente que a falta de trabalhabilidade compromete a concretagem. É necessário estudos mais aprofundados do ECC brasileiro quando aplicado como solução de reparo em elementos estruturais com manifestações patológicas diversas.

Seguindo na utilização do ECC brasileiro em elementos estruturais, diversas lacunas ainda necessitam serem preenchidas, como estudos de modelagem de estruturas e análise do ciclo de vida (ACV). Acredita-se que se essas variáveis forem preenchidas com resultados satisfatórios, o ECC brasileiro terá avanços promissores para ser difundido ainda mais pelo país. Esta tese visa contribuir com algumas variáveis que foram elencadas neste subitem.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental desta tese foi dividido em 3 fases, mostradas esquematicamente na Figura 33, cujos objetivos e métodos empregados são descritos a seguir. A primeira etapa constitui em estabelecer qual o teor de cinza de casca de arroz residual é o mais indicado para a matriz cimentícia dos ECC com materiais brasileiros. Para atender esse propósito foram propostos três teores de CCA residual distintos, estabelecidos em relação a trabalhos publicados como Righi (2015), Pereira da Costa (2015) e Muñhoz Rodrigues (2018), já previamente empregados em estudos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa LEME/UFRGS.

A primeira porcentagem estabelecida foi de 30% de substituição de cimento por CCA residual, escolhida como a de melhor desempenho mecânico e de durabilidade nos trabalhos de Righi (2015) e Pereira da Costa (2015). A segunda e a terceira porcentagens escolhidas foram de 50% e 70%, determinadas com o intuito de diminuir ao máximo o consumo de cimento dos compósitos. O aumento das porcentagens de CCA residual se torna uma alternativa interessante visto de que vários trabalhos já foram publicados Wang e Li (2007), Şahmaran e Li (2009), Zhu *et al.* (2014) e Yu Zhu (2012) com resultados promissores de ECC com altas porcentagens de cinza volante (material pozolânico com propriedades parecidas ao da CCA) como foram apresentados no subitem 2.1.4.

Uma definição fundamental para o estudo da etapa 1 é a obtenção de compósitos com comportamento de *strain-hardening* e múltipla fissuração sob carregamento de tração. A fase 1 tem uma parte destinada à caracterização mecânica do compósito, para isto é necessário entender como o compósito se comporta em situações de esforços mecânicos. Esta etapa ainda engloba alguns ensaios de caracterização de durabilidade deste compósito, como ensaios de reação álcali-sílica, penetração de íons cloretos e desgaste abrasivo. É importante analisar estes parâmetros para que se possa começar a entender onde esse material poderia ser melhor aplicado na construção civil.

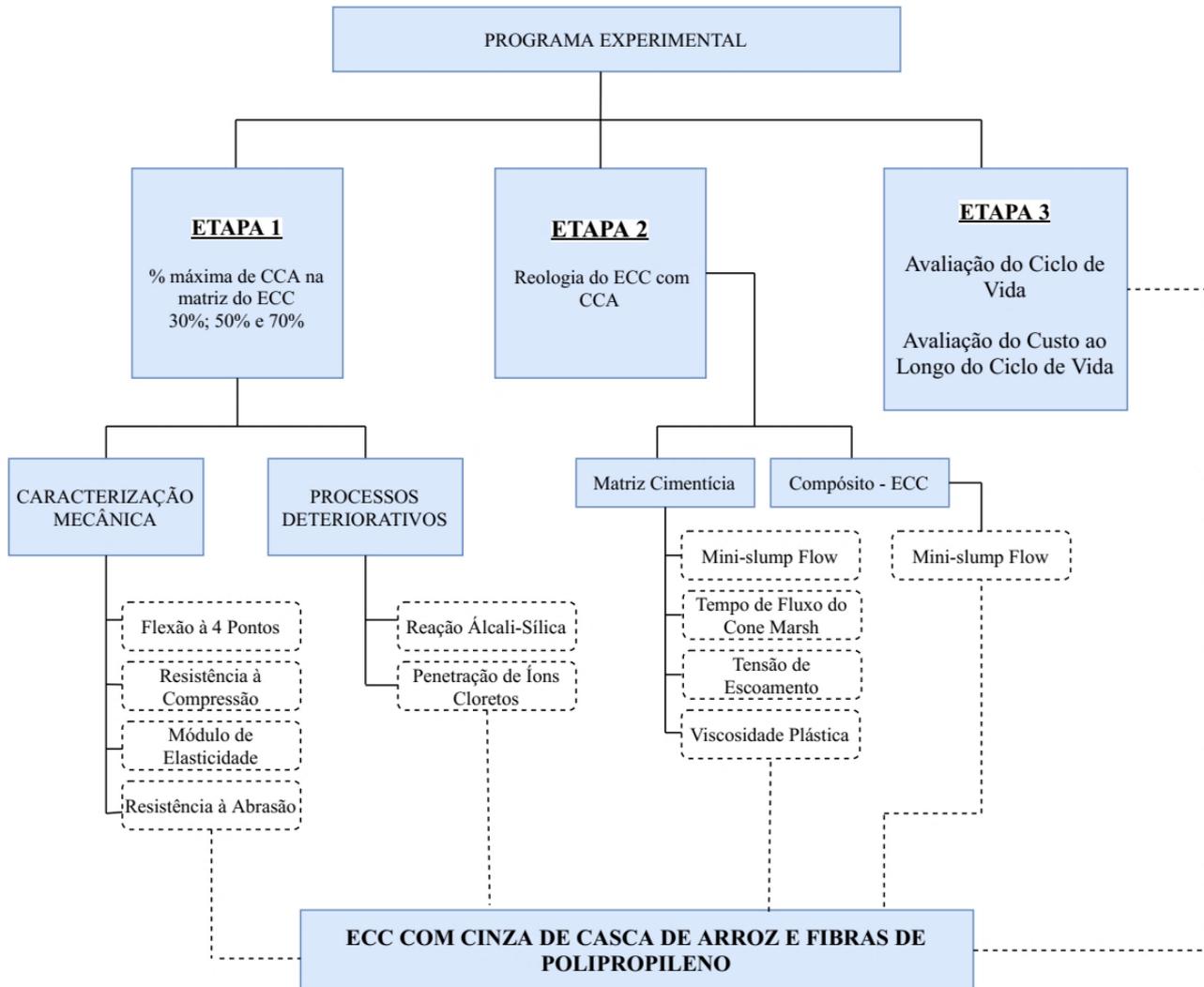
A etapa 2 contempla um estudo sobre a reologia dos ECCs com resíduo de cinza de casca de arroz nas três porcentagens já estabelecidas e posteriormente a modificação no traço com CCA residual que obteve melhor resultado na etapa 1, onde um estudo da reologia dos

ECCs se faz necessário. O traço já estudado pelo Grupo de Pesquisas do LEME já atingiu diversas características mínimas que um ECC deve conter como múltipla fissuração e comportamento *strain-hardening* em corpos de prova de pequena escala conforme os trabalhos de Righi *et al.* (2017) e, Costa *et al.* (2019). Para que se possa confeccionar peças em maior escala é necessário que este traço possua uma maior fluidez para que possa ser aplicado na construção civil. Para atingir essa propriedade ainda pouco estudada é necessário realizar um ajuste nesse traço, modificando a relação a/aglomerante e/ou as porcentagens de aditivo.

Os ensaios destinados a esta fase envolvem ensaios reológicos para medir a tensão de escoamento e viscosidade plástica da matriz cimentícia e ainda ensaios que analisem a trabalhabilidade destes compósitos quando incorporada a fibra de polipropileno. E espera-se no fim da etapa 2, conseguir obter informações necessárias para identificar quais possíveis aplicações na construção civil.

Por fim, na terceira etapa foi realizada uma avaliação do ciclo de vida (ACV) e uma avaliação do custo ao longo do ciclo de vida, levando em consideração dois cenários importantes para o desenvolvimento de possíveis aplicações. O cenário 1 contempla a ACV para produção de 1m³ de ECC em comparação a um concreto para pavimentos rígidos. Já o segundo cenário visa a aplicação de ECC como camada de *overlay* em pavimentos.

Figura 33 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autoria Própria.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento Portland que foi utilizado para a produção dos compósitos é o CP V-ARI de alta resistência inicial produzido pela Empresa Nacional. Suas características físicas, químicas e mecânicas, de acordo com informações fornecidas pelo fabricante, estão

apresentadas na Tabela 3. Foi realizado o ensaio de massa específica para a utilização na dosagem do ECC de acordo com a NBR 16605 (2017) e obteve-se o valor de 3,11 g/cm³.

Tabela 3 – Caracterização química, física do cimento CP V-ARI MAX (dados do fabricante e de análise em laboratório)

Composição Química do Cimento (%)	
C3S	78,37
C2S	-
C3A	5,47
C4AF	8,79
MgO	1,94
SO3	3,07
CO2	2,45
Resíduo insolúvel	0,54
Perda ao Fogo	3,76
Características físico-química	
Diâmetro médio (µm)	9,65
Área específica - Blaine (cm ² /g)	4598
Aspecto físico	sólido particulado
Massa Específica (g/cm ³)	3,09
pH	12,0 a 14,0
Resistência à Compressão (NBR 7215/2019)	
1 dia	30,9 MPa
3 dias	45,5 MPa
7 dias	50,7 MPa
28 dias	55,50 MPa

Fonte: BRENNAND CIMENTOS (2018).

3.1.2 Cinza da casca de arroz (CCA) residual

A cinza de casca de arroz da queima sem controle de temperatura que foi utilizada neste trabalho é utilizada como combustível no processo de parbolização dos grãos de arroz. Esta queima se processa de maneira instantânea em fornalhas com grelhas, resultando como rejeito deste processo uma cinza de cor predominantemente preta ou cinza escuro (Figura 34). A

empresa CAAL Alegrete/RS que doou esta cinza não dispunha de informações precisas a respeito das condições de queima adotadas na geração da cinza, assim foi necessário realizar toda a caracterização física e química deste lote de cinza.

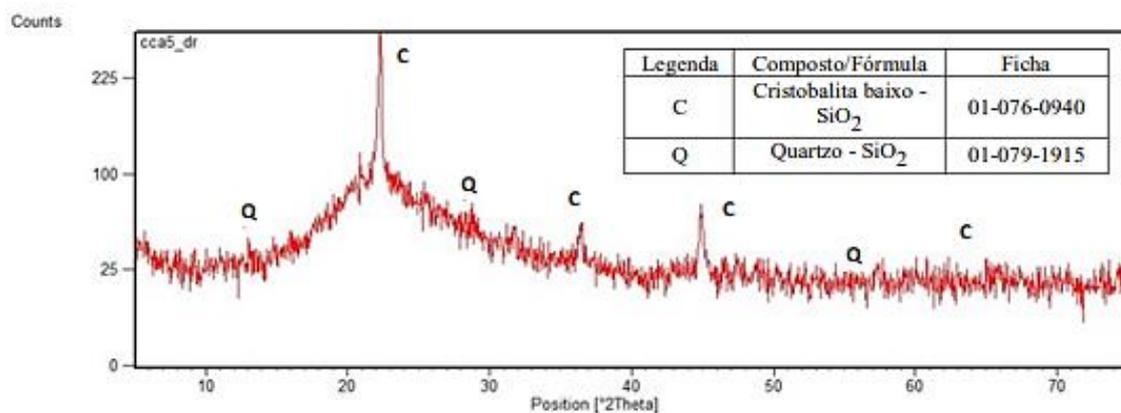
Figura 34 – Cinza de casca de arroz sem controle de queima



Fonte: Autoria Própria.

Para substituição parcial do cimento nos compósitos cimentícios, esta cinza teve sua granulometria reduzida através de um processo de moagem de 8 horas, com o emprego de um moinho de bolas². A Tabela 4 apresenta as características físicas e químicas da cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho após o processo de moagem. A Figura 35 apresenta o difratograma da cinza de casca de arroz utilizada neste estudo.

Figura 35 – Difratograma da cinza de casca de arroz



Fonte: Autoria Própria.

² O moinho de bolas utilizado neste trabalho possui 310 mm de altura e 275 mm de diâmetro. O mesmo contém 75 bolas de 38 mm de diâmetro que são utilizadas no processo de moagem.
Influência De Altos Teores De Cinza De Casca De Arroz Nas Propriedades Reológicas, Mecânicas E De Durabilidade Nos Engineered Cementitious Composites (ECC)

Tabela 4 – Características químicas e físicas da cinza de casca de arroz (CCA)

Características físicas e químicas		Normas	
Massa específica (g/cm ³)		2,06	NBR16605 (2017)
Perda ao Fogo (%)		13,99	NBR NM 18 (2012)
Índice de atividade pozolânica (%)		162,48	NBR 5752 (2014)
Diâmetro médio (µm)		3,59	Granulometria a laser
Composição química			
SiO ₂ (%)	82,21	MnO (%)	0,34
K ₂ O (%)	1,85	Al ₂ O ₃ (%)	0,10
CaO (%)	0,75	SO ₃ (%)	0,19
Fe ₂ O ₃ (%)	0,48	CO ₂ (%)	12,96
P ₂ O ₅ (%)	0,65		

Fonte: Autoria Própria.

3.1.3 Agregado miúdo

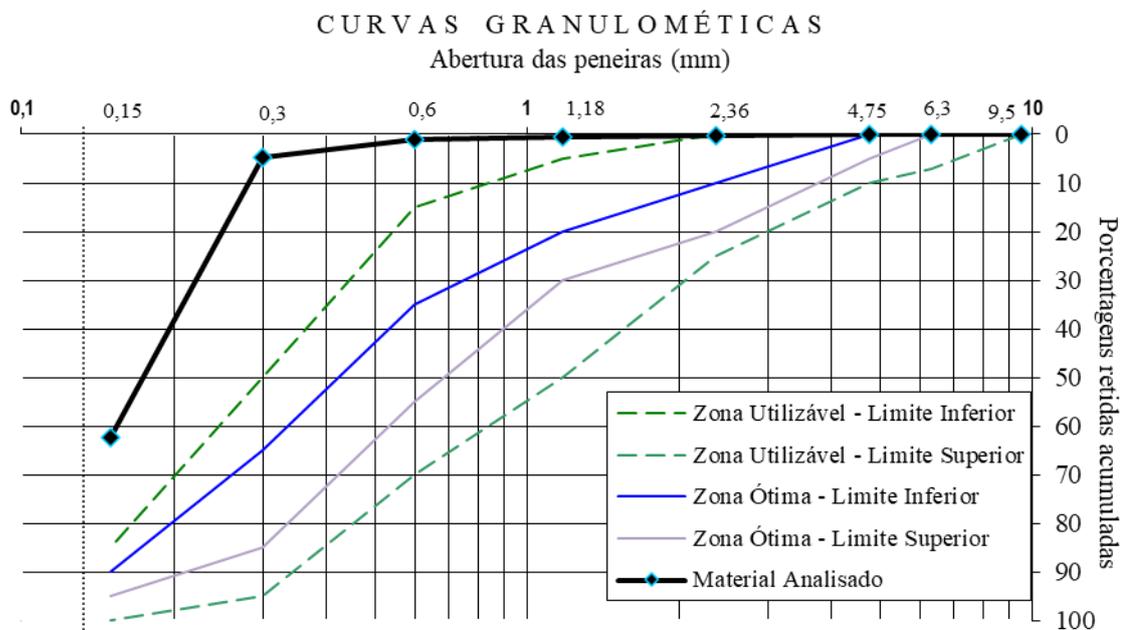
Para confecção dos compósitos foi utilizada uma areia fina de origem natural, do tipo quartzosa. A Tabela 5 descreve suas características granulométricas (NBR NM 248, 2003) e massa específica (NBR 16916, 2021), seguida da sua curva granulométrica representada na Figura 36, em conjunto com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidos pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 5 – Composição granulométrica da areia fina

Abertura das peneiras (mm)	% Retida	% Retida acumulada
4,8	0,40	0,40
2,4	0,30	0,70
1,2	0,40	1,10
0,6	0,40	1,40
0,3	3,30	4,70
0,15	53,90	58,60
Fundo	37,60	100
TOTAL	100	-
Módulo de finura		0,69
Dimensão máxima característica (mm)		0,30
Massa específica (g/cm ³)		2,52

Fonte: Autoria Própria.

Figura 36 – Curva granulométrica da areia fina



Fonte: Autoria Própria.

3.1.4 Fibra de polipropileno

A fibra de polipropileno que foi utilizada para confecção dos compósitos são produzidas e encontram-se disponíveis comercialmente no Brasil. As fibras utilizadas neste trabalho são do tipo monofilamento (Figura 37) e possuem 10 mm de comprimento, produzidas pela empresa Brasilit – Saint-Gobain. A Tabela 6 apresenta suas propriedades físicas e mecânicas.

Figura 37 – Fibra de polipropileno monofilamento



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 6 – Características da fibra de polipropileno

Propriedades	
Densidade (g/cm ³)	0,91
Comprimento (mm)	10
Diâmetro (µm)	12
Resistência à tração (MPa)	850
Enlongamento na ruptura (%)	21
Módulo de elasticidade (GPa)	6
Resistência à Álcalis	Excelente

Fonte: BRASILIT – SAINT-GOBAIN (2017).

3.1.5 Aditivos

Para confecção dos compósitos foi utilizado aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico, de nome comercial TEC FLOW 8000 da Empresa Grace.

3.2 ESTUDO DA ETAPA 1

3.2.1 Especificações dos traços e procedimento de mistura

Neste item são especificados os traços e proporções da mistura dos compósitos estudados para a etapa 1 desta tese, bem como os procedimentos utilizados na mistura. O traço utilizado para os compósitos cimentícios foi desenvolvido ao longo dos anos no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS), a partir da adaptação do traço consagrado do material, criado por Li (2003). A nomenclatura adotada para designação de cada traço da etapa 1 encontra-se na Tabela 7.

As proporções das misturas dos ECCs, com a utilização de cinza de casca de arroz (CCA) residual, podem ser visualizadas na Tabela 8. Nesta fase foram estudadas as porcentagens de substituição de cimento por cinza de casca de arroz sem controle de queima nos valores de 30%, 50% e 70%. A substituição foi realizada em massa, todos os ensaios destinados à etapa 1 foram realizados com a idade de cura de 28 dias.

Tabela 7 – Nomenclatura utilizada na designação dos traços da fase 1

Denominação	Código
Compósito cimentício com 30% CCA	30ECC
Compósito cimentício com 50% CCA	50ECC
Compósito cimentício com 70% CCA	70ECC

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Proporções das misturas.

Código	Consumo de material (kg/m ³)					
	Cimento	CCA	Areia fina	Fibra	Aditivo	Água
30ECC	747,29	295,27	738,19	18	5,90	435,04
50ECC	566,47	476,09	714,14	18	5,71	476,09
70ECC	397,06	645,50	691,61	18	5,53	533,00

Fonte: Autoria Própria.

A mistura dos materiais do ECCs foi realizada em um misturador mecânico planetário especial para argamassas com capacidade de 2 litros. Os materiais secos (cimento, areia e CCA) foram colocados no misturador até se obter uma mistura de pós uniforme, por aproximadamente 1 minuto. Posteriormente, se procede à adição da água de amassamento e do aditivo superplastificante.

A pasta obtida nesta etapa de mistura é extremamente fluída para permitir a completa dispersão das fibras. Após as fibras serem adicionadas, são necessários 3 minutos de rotação em velocidade elevada para a total dispersão da fibra.

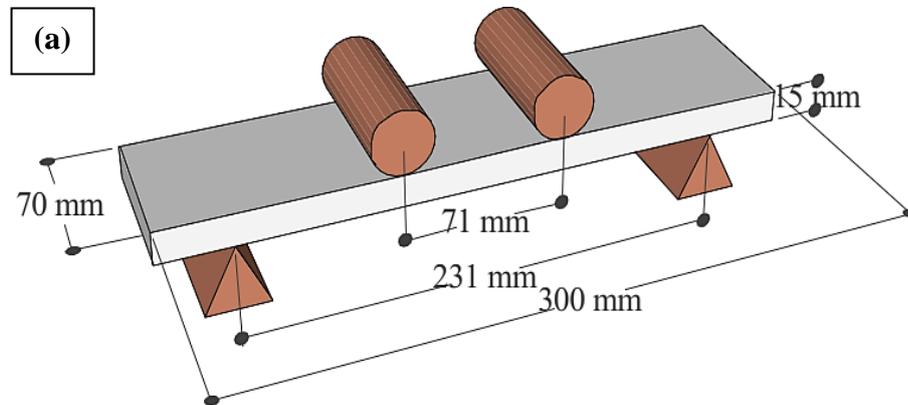
3.2.2 Ensaios de Caracterização Mecânica e de Durabilidade

3.2.2.1 Flexão a Quatro Pontos

O ensaio de flexão que foi utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas Leme, publicado primeiramente no trabalho de Casagrande (2012). Baseado em Magalhães (2010), o ensaio tem como base a Norma ASTM C1609 – Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete, realizados a quatro pontos. Os corpos de prova têm dimensões de 300 mm x 70 mm x 15 mm onde a carga aplicada concentra-se igualmente dividida entre os dois terços do vão, a uma distância de 77 mm dos apoios e o vão possui 231 mm de distância entre os apoios. A Figura 38 detalha a configuração do ensaio. O mesmo possui dois LVDTs com comprimento de 10 mm, para medir deslocamento

do corpo de prova, um posicionado na vertical e outro na horizontal. A velocidade adotada no carregamento foi de 1,2 mm/minuto.

Figura 38 – Configuração do ensaio de flexão a quatro pontos (a) Dimensões do corpo de prova (b) Corpo de prova durante o ensaio de flexão



Fonte: Autoria Própria.

3.2.2.2 Módulo de Elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade seguiu os preceitos da norma NBR 8522 (2017). A norma define as tensões que devem ser aplicadas aos corpos-de-prova e o tempo em que o carregamento deve ser mantido, além da velocidade de aplicação. O ensaio consiste na aplicação de três ciclos de carregamento alcançando uma tensão de aproximadamente 40% da resistência à compressão do ECC.

Para a realização do ensaio foi utilizada uma prensa SHIMADZU modelo UH-I com capacidade máxima de carga de 2000 kN. e os deslocamentos foram medidos por dois LVDTs

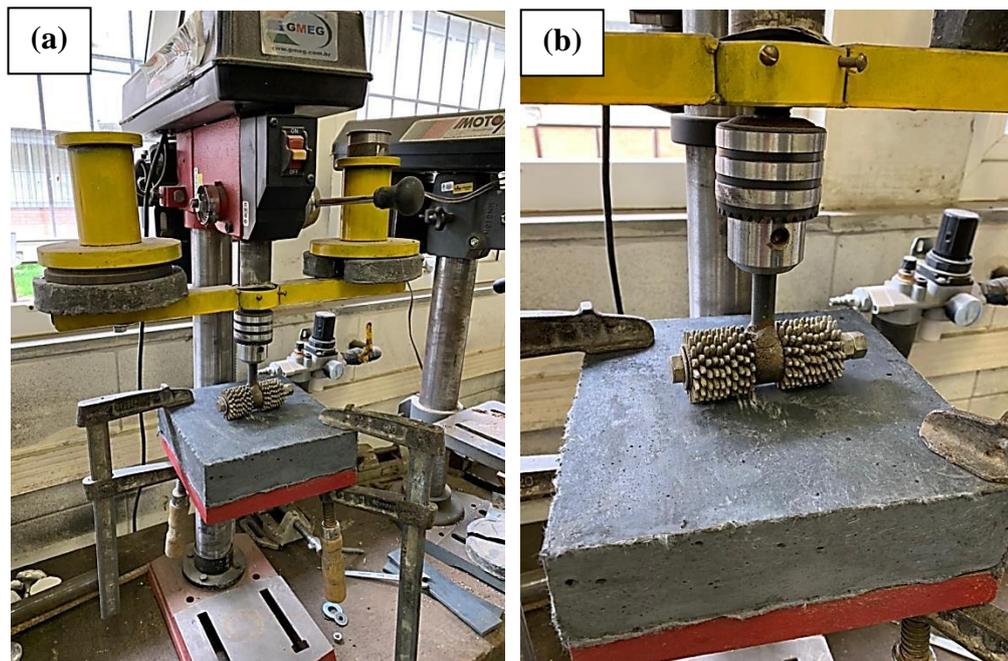
com comprimento de 10 mm. Para este ensaio foi realizada a moldagem de 5 corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm para cada traço estudado de ECC. Foi realizada uma análise de variância ANOVA para os traços estudados.

3.2.2.3 Resistência à Abrasão

Para avaliar o desgaste abrasivo do ECC para uma aplicação em pavimentos, é necessário conhecer a forma de desgaste que o compósito se dá ao atrito. O teste de abrasão utilizado nesta pesquisa se dá pelo método de corte e foi realizado de acordo com a ASTM C944 (2019). Este ensaio dá uma indicação da resistência ao desgaste dos ECCs, uma característica importante para ser avaliada para a qualidade de pavimentos e pontes sujeitas ao tráfego.

O procedimento produz um efeito abrasivo muito mais rápido do que os outros métodos de teste. O aparelho de ensaio é constituído por um cortador rotativo e um dispositivo de perfuração, com uma bucha capaz de prender e rodar o cortador de abrasão a uma velocidade de 200 rpm. A Figura 39 mostra o ensaio de abrasão, sendo possível observar o equipamento utilizado (Figura 39a) e o cortador rotativo (Figura 39b).

Figura 39 – Ensaio de abrasão (a) Equipamento utilizado (b) Cortador rotativo



Fonte: Autorial Própria.

Para execução do ensaio, foi confeccionado um corpos de prova com as dimensões estabelecidas para se adaptar ao equipamento, sendo elas: 250 mm x 250 mm x 50 mm. Foram utilizados uma amostragem de 3 corpos de prova por traço estudado.

Os corpos de prova foram secos em estufa a 105 °C até constância em massa e determinadas suas massas iniciais. Na sequência, foram submetidos ao teste de abrasão, no qual uma carga de 197 N foi aplicada sobre cada corpo de prova em intervalos de 2 minutos. No final de cada período, as amostras foram retiradas do dispositivo de teste para limpeza dos detritos presentes na superfície e medição das profundidades de desgaste com aproximação de 0,025 milímetros. Os carregamentos de 2 minutos de duração foram repetidos três vezes para cada amostra. Ao final do ensaio, os corpos de prova foram lavados, novamente secos em estufa a 105 °C até constância em massa e determinadas suas massas finais.

3.2.2.4 Resistência à Compressão

A resistência a compressão axial foi realizada segundo ensaio padronizado pela NBR 5739 (2018). A resistência do compósito foi medida para a idade de 28 dias na etapa 1 deste trabalho. Foram utilizados 5 corpos de prova para cada traço estudado e os corpos de prova foram submetidos à ruptura por compressão através de uma prensa hidráulica servo controlada marca - SHIMADZU modelo UH-I com capacidade máxima de carga de 2000 kN. Também foi realizada uma análise de variância ANOVA para os traços estudados.

3.2.2.5 Penetração Íons Cloretos

A realização do ensaio acelerado de penetração de íons cloretos seguiu os preceitos da ASTM C1202 (2010), este ensaio consiste em medir a carga elétrica passante no corpo de prova de dimensões 9,5 x 5,1 cm (diâmetro x altura), submetidos a uma tensão fixa de $60 \pm 0,1$ V durante um período de 6 horas.

Para a montagem do ensaio são necessárias duas meias-células de acrílico, onde duas faces são expostas a uma solução de cloreto de sódio (NaCl), com 3% de concentração (em massa), e hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N. Entre as meias-células é gerada uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do compósito sob a ação de um campo elétrico.

Para obtenção da amostra de ensaio, após completar 28 dias de cura, os corpos de prova de dimensões 10 x 20 cm são serrados, utilizando-se somente as partes centrais e rejeitando-se a face superior e inferior a fim de desconsiderar o efeito parede. A preparação dos corpos de prova consiste na aplicação de uma camada de selante de poliuretano na face curva do corpo de prova e, após secagem, imersão em água por um período de 24 horas, visando à saturação dos poros. Após esta etapa, as amostras são secas superficialmente e acopladas às células para realização do ensaio, utilizando silicone como vedação. A Figura 40 ilustra o ensaio em andamento, durante o ensaio, a temperatura ambiente foi mantida constante em 23 °C.

Figura 40 – Ensaio de Penetração de íons cloretos em andamento



Fonte: Autoria Própria.

A carga total passante entre as duas meia-células pode ser obtida através da Equação 3. A partir disso, é possível classificar qualitativamente os compósitos quanto ao risco de penetração de íons cloretos, conforme a Tabela 9, prevista na ASTM C1202.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Q – carga total passante (coulombs);

I_0 – corrente (amperes) medida imediatamente após a aplicação da tensão;

I_t – corrente (amperes) medida nos intervalos “t” em minutos.

Tabela 9 – Classificação quanto ao risco de penetração de íons cloretos

Carga passante	Risco de penetração de íons cloretos
> 4000	Alto
2000 a 4000	Moderado
1000 a 2000	Baixo
100 a 1000	Muito baixo
< 100	Desprezível

Fonte: ASTM C 1202 (2010).

3.2.2.6 Reação Álcali-Sílica

O ensaio para avaliação da reação álcali-sílica seguiu os preceitos da NBR 15577 – parte 4 (2018). Algumas adaptações foram necessárias devido a norma estar relacionada com a avaliação da reação álcali-agregado. Este ensaio foi realizado para a identificação da reação álcali-sílica nos ECCs com altos teores de CCA residual.

Segundo a NBR 15577 – Parte 1 (2018), a classificação quanto ao potencial reativo, quando empregada a parte 4, obedece os seguintes limites de expansão das barras:

- Expansões inferiores a 0,19 % aos 30 dias de ensaio indicam comportamento inócuo do material;
- Expansões iguais ou superiores a 0,19 % aos 30 dias indicam comportamento potencialmente reativo material.

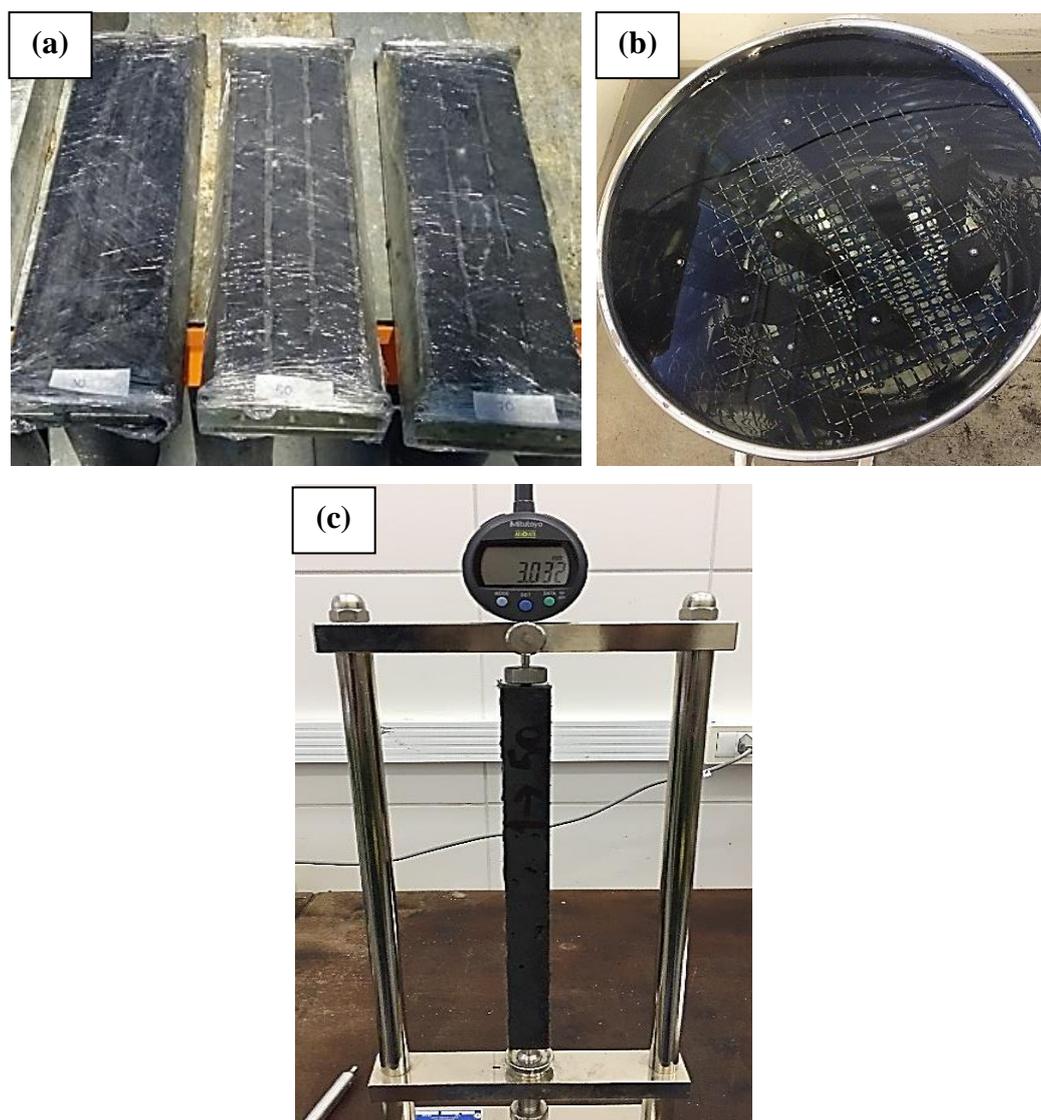
No entanto, como o objeto de análise deste estudo é avaliar o efeito do aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz na matriz cimentícia dos compósitos, também foram adotados os seguintes limites da mesma NBR 15577 – Parte 5 (2018) como critério para classificação da reatividade desse material:

- Expansões inferiores a 0,10 % aos 16 dias de ensaio indicam comportamento inócuo do material;
- Expansões iguais ou superiores a 0,10 % aos 16 dias indicam comportamento potencialmente reativo do material.

Foi realizada uma amostragem de 3 corpos de prova prismáticos (dimensões 25 x 25 x 285 mm) para cada traço estudado (Figura 41). Logo após a moldagem, as barras de compósitos foram submetidas a um período de cura inicial em câmara úmida a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante (24 ± 1) h, com a face superior protegida de respingos (Figura 41a). Após este período foi utilizada

cura úmida por 28 dias. Foi realizada a leitura inicial das barras e após as amostras foram mantidas em um recipiente com solução de NaOH ($1,0 \pm 0,1$) N a uma temperatura de (80 ± 2) °C. pelo período de 30 dias, conforme a Figura 41b. Foram realizadas leituras em um comparador de comprimento com precisão de 0,001 mm nas idades de 1, 2, 7, 10, 14, 16, 21, 24, 28 e 30 dias (Figura 41c).

Figura 41 – Ensaio de reação álcali-sílica (a) Moldagem dos corpos de prova (b) Ensaio em andamento (c) Medição da retração



Fonte: Autoria Própria.

3.3 ESTUDO DA ETAPA 2

Uma das maiores dificuldades já relatadas no subitem 2.1.6 deste trabalho, é de se obter uma trabalhabilidade adequada do ECC quando aplicado em escalas de moldagens maiores. O uso da fibra de PVA ou de polipropileno na sua adição máxima de 2%, e a sua distribuição aleatória na matriz cimentícia, causam uma baixa capacidade de adensamento, necessitando um processo não convencional de moldagem.

3.3.1 Análise da Reologia dos ECC-CCA

Este tipo de compósito foi desenvolvido para atender os princípios de micromecânica e desenvolver uma alta ductilidade. Para que esta característica seja atendida, diversos estudos, (já citados no subitem 2.1.2) revelaram uma porcentagem ideal de fibras para os ECCs em torno de 2% em volume. O processo de dispersão das fibras influencia diretamente nas propriedades mecânicas deste compósito. Além das fibras, as características dos materiais (tipo, tamanho e quantidade) podem restringir a ampla aplicação e usabilidade deste compósito na construção civil. Desde o traço original concebido por Victor Li (2003) e adaptado para os materiais brasileiros, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa LEME/UFRGS (Righi, 2015; Pereira da Costa, 2015 e Muñoz Rodríguez, 2018) mantiveram-se constantes todas as variáveis do traço, como relação a/c, aditivo superplastificante, variando em alguns casos apenas a relação do cimento com adições minerais.

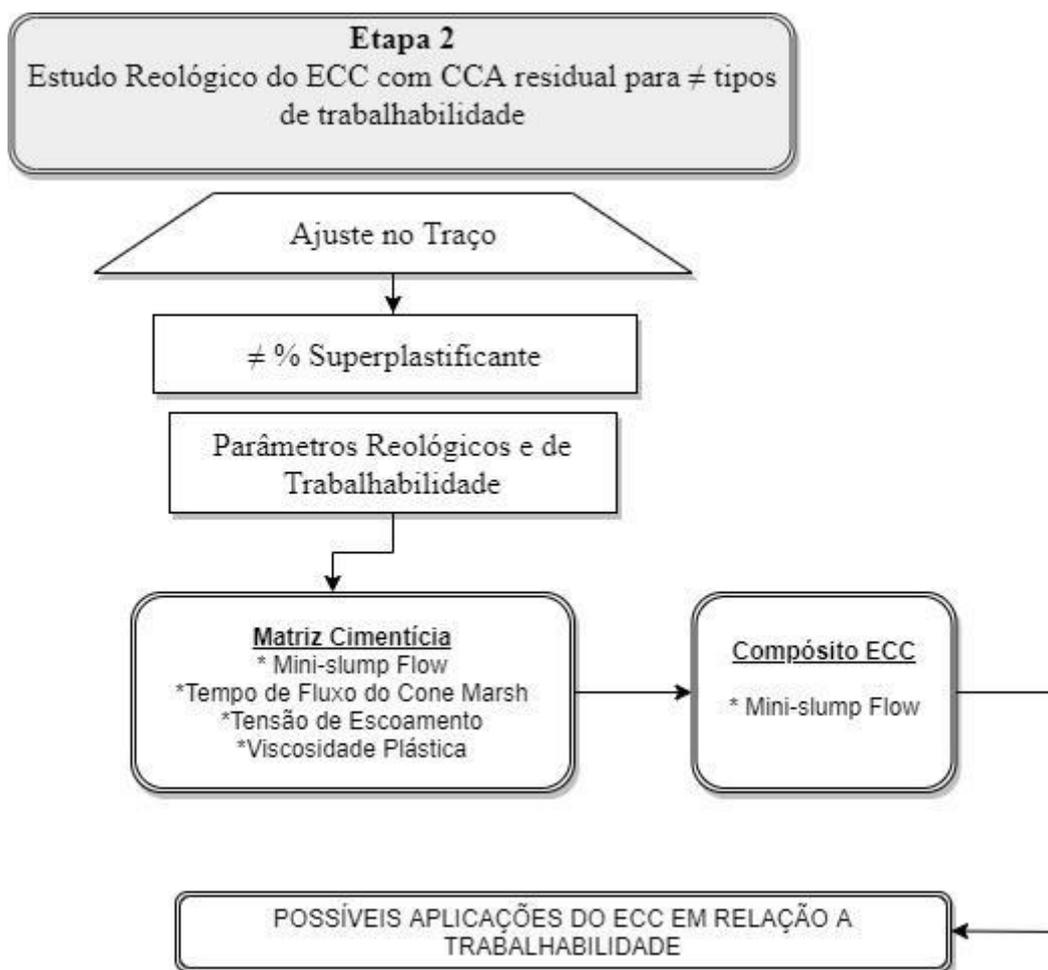
Ao longo dos últimos estudos do grupo de pesquisa Leme, foi possível perceber que o traço de ECC com cinza de arroz residual necessitaria passar por um ajuste para que seja possível pensar em elementos em escala real. A grande dificuldade da utilização do ECC se dá pela sua baixa trabalhabilidade, necessitando o desenvolvimento de novas técnicas de moldagem e algumas vezes se tornando inviável financeiramente.

Para tentar sanar a baixa trabalhabilidade do ECC com cinza de casca de arroz residual, foi realizado um estudo inicial da reologia dos ECC com CCA nas três porcentagens indicadas na etapa 1 deste estudo. Para isso foram necessários estudos reológicos e de trabalhabilidade tanto da matriz cimentícia sem fibra, quanto a trabalhabilidade do compósito com fibra conforme Figura 42 .

Para se obter diferentes trabalhabilidades foi proposto modificar a porcentagem de superplastificante em diferentes intervalos. Estes intervalos visam descobrir algum efeito mais

sensível sobre os parâmetros de projeto que governam o estado fresco, reológico e mecânico dos compósitos. Uma nova nomenclatura foi adotada para designação de cada traço da etapa 2 (Tabela 10).

Figura 42 – Fluxograma da Fase 2



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 – Nomenclatura utilizada na designação dos traços da fase 2

Denominação	Código
30ECC com proporção de aditivo 0,6%	30ECC-0,6
50ECC com proporção de aditivo 0,6%	50ECC-0,6
70ECC com proporção de aditivo 0,6%	70ECC-0,6

30ECC com proporção de aditivo 0,7%	30ECC-0,7
50ECC com proporção de aditivo 0,7%	50ECC-0,7
70ECC com proporção de aditivo 0,7%	70ECC-0,7
30ECC com proporção de aditivo 0,8%	30ECC-0,8
50ECC com proporção de aditivo 0,8%	50ECC-0,8
70ECC com proporção de aditivo 0,8%	50ECC-0,8

Fonte: Autoria Própria.

3.3.2 Determinação dos Parâmetros Reológicos, Trabalhabilidade e Mecânicos da Matriz Cimentícia

Para este estudo foi utilizado o modelo de Bingham, que é tradicionalmente usado para determinar os parâmetros reológicos (tensão de escoamento e viscosidade plástica) de argamassas e concretos, conforme descrito no subitem 2.6.1 desta tese.

A explicação para o comportamento de um fluido plástico ou binghamiano é que o material, em repouso, apresenta uma estrutura tridimensional com rigidez suficiente para resistir a qualquer tensão inferior à tensão de escoamento e se comporta como um sólido elástico rígido. Caso a tensão de escoamento seja excedida, a estrutura se desintegra e o sistema se comporta como um fluido newtoniano. Quando a tensão de cisalhamento aplicada for reduzida e atingir valores inferiores à tensão de escoamento, a estrutura tridimensional é recuperada (TANNER, 1986).

3.3.2.1 Viscosidade Plástica e Torque

Uma maneira de medir a viscosidade plástica é por meio de um viscosímetro rotacional cilíndrico concêntrico de paredes lisas (Brookfield DV-II + Pro) em 23 ± 2 °C. A viscosidade da matriz cimentícia do ECC foi medida em diferentes rotações velocidade que variam de 0 a 100 rpm, o que corresponde a uma taxa de cisalhamento de 34 segundos. Após isso, a velocidade de rotação diminui gradualmente de 100 a 0 rpm. As amostras foram ensaiadas a tensão de cisalhamento por 20 segundos para cada taxa de cisalhamento escolhida. Para as misturas da matriz cimentícia do ECC foi assumido o comportamento de Bingham. A Figura

43 ilustra a etapa do ensaio. A temperatura ambiente do laboratório foi mantida constante e a umidade relativa foi verificada antes cada teste.

Figura 43 – Viscosímetro rotacional cilíndrico concêntrico de paredes lisas (Brookfield DV-II + Pro)



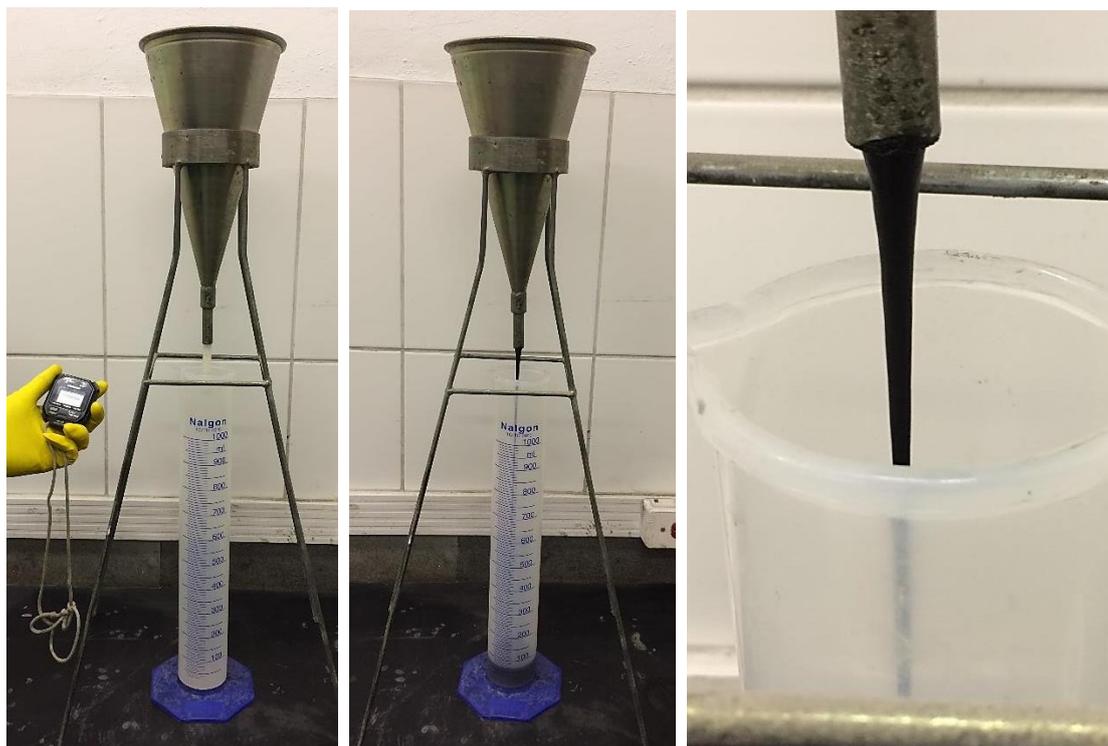
Fonte: Autoria Própria.

3.3.2.2 Determinação da Fluidez pelo Método de Cone de Fluxo Marsh

Um outro método para medir a viscosidade da matriz cimentícia do ECC é por meio do método do cone de Marsh. Este ensaio consiste em medir o tempo necessário para um volume conhecido de matriz cimentícia passar por um cone metálico de dimensões conhecidas. O ensaio no cone de Marsh tem sido usado previamente para avaliar a fluidez nas pastas e argamassas. O procedimento segue os preceitos estabelecidos pela norma americana ASTM C 939 (2016) - Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method).

Os equipamentos utilizados no ensaio são: o cone de Marsh, um beaker graduado de 1000 ml, uma proveta graduada de 500 ml, um cronômetro. O Cone de Marsh consiste de um cone oco de metal invertido, aberto no topo e tem uma abertura no fundo, onde é fixado um bocal removível de 8 mm de diâmetro (d), a Figura 44 ilustra o procedimento do ensaio.

Figura 44 – Ensaio do Cone de Marsh



Fonte: Autoria Própria.

3.3.2.3 Determinação da Trabalhabilidade pelo Método Mini-Slump Flow

Este ensaio consiste em preencher um molde de cone truncado com diâmetro de 82 mm na parte inferior e 70 mm na parte superior e uma altura de 40 mm. Este molde é colocado sob uma placa lisa de vidro, preenchida com matriz cimentícia e depois é levantado o cone assim deixando a matriz se espalhar livremente na base. Nesse ensaio foi verificada a capacidade de espalhamento das matrizes cimentícias já ensaiadas no cone de Marsh através da média entre dois diâmetros finais perpendiculares, sem utilizar nenhum método de compactação. Para este ensaio foi realizada a determinação da trabalhabilidade da matriz cimentícia sem fibra e do compósito ECC com fibra de polipropileno, para que fosse possível verificar a variação percentual devido à adição de fibra de polipropileno na matriz do ECC. A Figura 45 mostra o ensaio de abatimento do ECC.

Figura 45 – Ensaio de abatimento do ECC



Fonte: Autoria Própria.

3.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV

Para a presente análise, a técnica ACV (Avaliação do Ciclo de Vida), foi selecionada, uma vez que permite destacar e avaliar os pontos críticos e as margens de melhoria no ciclo de vida de produtos. Esta técnica tem como objetivo geral, a abordagem dos aspectos ambientais de um produto e seus potenciais impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida (ZANGHELINI *et al.*, 2014).

O estudo foi desenvolvido de acordo com os requisitos das normas NBR ISO 14040 (2014) e NBR ISO 14044 (2014). Para esta tese, foi realizada a ACV em dois cenários, o primeiro levando em consideração apenas a produção do ECC com diferentes porcentagens de substituição do cimento por cinza de casca de arroz residual, comparando com um concreto para pavimentação. O segundo cenário de análise é a utilização do ECC como *overlay* em pavimentos rígidos. Os dois cenários foram desenvolvidos conforme as seguintes fases descritas na NBR ISO 14040 (2014):

- 1) Definição de objetivo e escopo, identificando o propósito de cada cenário, os limites do sistema, a unidade funcional (UF) e premissas;
- 2) Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), envolvendo a compilação e quantificação de ambos os fluxos de entrada e saída e incluindo a análise de dados;
- 3) Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV), com o objetivo de compreender e avaliar os impactos ambientais com base na análise de inventário no âmbito do objetivo e escopo do estudo;

4) Interpretação do Ciclo de Vida, em que os resultados da avaliação de impacto e a análise de inventário são analisados e interpretados para o estabelecimento de recomendações, de modo a ser coerente com o objetivo e escopo do estudo.

Os dados coletados durante o desenvolvimento ICV foram calculados no *software* Excel acessando o banco de dados Ecoinvent v.3.6. Com relação a alocação de impactos, considerou-se que os impactos de produção da cinza de casca de arroz residual são computados apenas na indústria de origem, mais especificamente à indústria arroseira. Nesse sentido, também não foi avaliada a perda de oportunidade referente a outras possíveis aplicações dessa cinza, uso como fertilizante, por exemplo. Na fronteira do estudo, foram considerados apenas os processamentos fundamentais para obtenção do desempenho do ECC, nomeadamente a moagem da cinza, além do transporte.

O método CML-2001 (Guinee *et al.*, 2000) foi aplicado para o cálculo dos impactos. O CML-2001 é um método do tipo “midpoint”, orientada para o problema, com 6 categorias de impacto ambiental, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 – Categorias de impacto ambiental do método CML-2001.

Categoria de Impacto	Fator de Caracterização	Unidade	Sigla
Depleção dos recursos abióticos	Potencial de depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ	ADP (ff)
	Potencial de depleção abiótica (elementos não fósseis)	kg de Sb eq	ADP
Acidificação	Potencial de acidificação de solo e água	kg SO ₂ eq	AP
Eutrofização	Potencial de eutrofização	kg PO ₄ ⁻³ eq	EP
Mudanças climáticas	Potencial de aquecimento Global (GWP 100 anos)	Kg CO ₂ eq	GWP100
Depleção da camada de ozônio	Depleção da camada de ozônio	Kg CFC-11 eq	ODP
Formação de fotooxidantes	Potencial de formação de ozônio fotoquímico	kg ethylene eq.	POCP

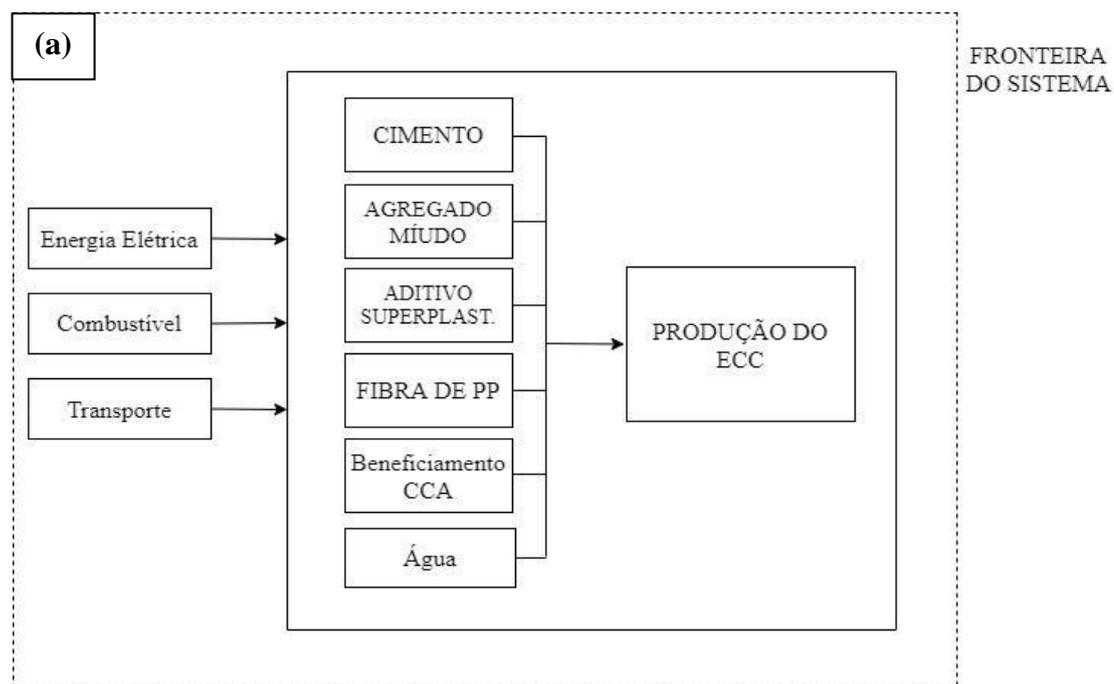
Fonte: Autoria Própria.

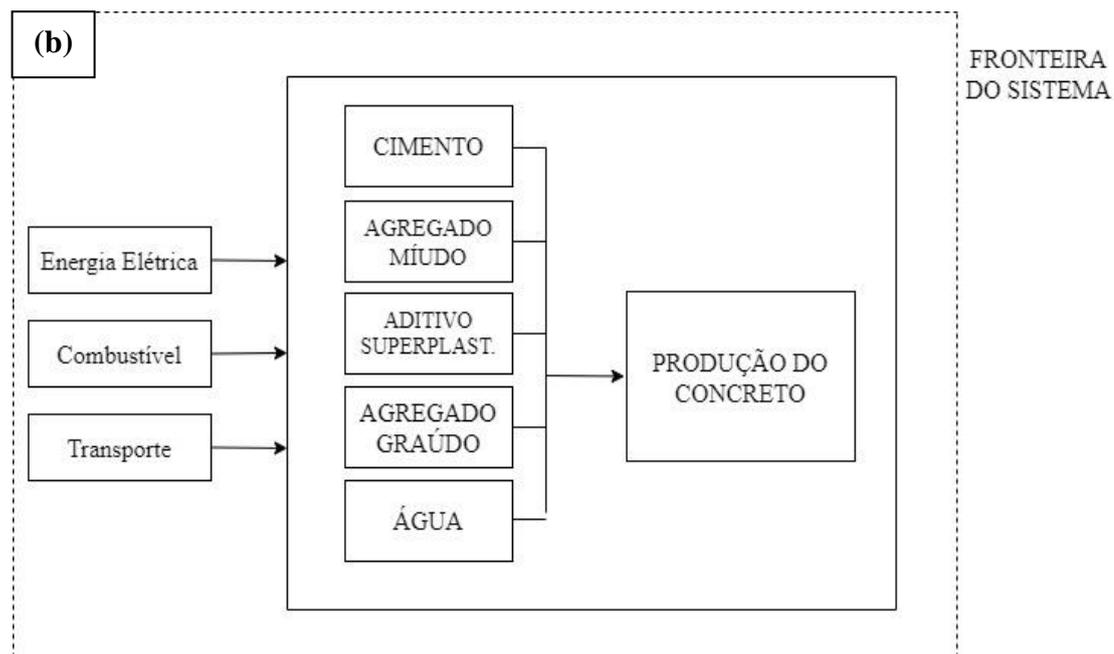
3.4.1 Cenário 1: Produção de ECCs

3.4.1.1 Objetivo e Escopo

O objetivo do cenário 1 foi comparar os impactos ambientais potenciais da produção de ECC com diferentes porcentagens de CCA com a produção de um traço de concreto para pavimento rígido. O sistema de produto estudado para o cenário 1 considerou a produção de concreto dosado em central, cuja fronteira adotada foi do “berço-ao-portão” (Figura 46). Foram considerados os processos de obtenção das principais matérias-primas (cimento, cinza, agregados, superplastificante, fibra), o transporte e o processo de mistura do ECC (Figura 46a) e do concreto em uma central de concretagem (Figura 46b).

Figura 46 – Sistema de Produto do Cenário 1 (a) Produção dos ECCs (b) Produção do concreto





Fonte: Autoria Própria.

3.4.1.2 Especificações do Traço

Para a realização do cenário 1 foi estipulada a unidade funcional de uma de produção de 1m^3 de concreto/ECC tanto para a produção do concreto de pavimento rígido, quanto para o ECC com e sem substituição de cimento por CCA. O traço para pavimento (C.P.) foi utilizado por Pereira da Costa (2015), dimensionado em função da resistência à tração na flexão, foi definido de modo a obter um valor médio de 5 MPa, concebendo o valor mínimo exigido para aplicação em pavimentos rígidos.

Para este traço, foi utilizada brita de origem basáltica do tipo 1, dois tipos de areia de origem natural classificada como areia fina e areia média no traço de 1:0,72:1,69:2,27 (cimento:areia fina: areia média:brita 1) com relação a/c:0,389 e 1% de aditivo superplastificante. A Tabela 12 apresenta a composição mássica por m^3 das misturas estudadas.

Tabela 12 – Composição dos traços para 1m³

Código	Quantidade de material kg (1m ³)							
	Cimento	CCA	Areia fina	Areia Média	Brita 1	Fibra	Aditivo	Água
ECC-REF	1042,57	-	781,93	-	-	18	5,90	435,04
30ECC	747,29	295,27	738,19	-	-	18	6,54	437,41
50ECC	566,47	476,09	714,14	-	-	18	5,71	476,09
70ECC	397,06	645,50	691,61	-	-	18	5,53	533,00
C.P.	422	-	406,8	610,2	958,4	-	2,8	163,99

Fonte: Autoria Própria.

3.4.1.3 Análise do Inventário do Ciclo de Vida – Cenário 1

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) quantifica o uso de recursos, energia e liberações ambientais associados com o sistema avaliado. Esta fase foi desenvolvida em função dos dados disponíveis para a produção dos ECCs e do concreto de acordo com o Ecoinvent 3.6. Esta fase permite a quantificação da utilização dos recursos de entrada principais e o consumo de energia, bem como do transporte envolvido.

a) Cimento

Para a proposta desta etapa, considerou-se o cimento Portland produzido no Brasil. Essa modelagem analisou o processo produtivo do cimento do “berço-ao-portão”, incluindo a extração/produção e transporte das matérias-primas, a produção do clínquer e o processo de moagem final do cimento, assim como a eletricidade utilizada.

No Brasil, o sistema rodoviário é o modal mais empregado para o transporte de cimento entre as cimenteiras e os consumidores, alcançando 96% do total de cimento transportado. De acordo com o SNIC (2020), o raio de distribuição do cimento atinge em média 300 a 500 quilômetros nas regiões Sul e Sudeste. Nas demais regiões do país, seu alcance é mais extenso, chegando a 1000 km, sendo também utilizado o modal hidroviário. Nesse trabalho foi considerado que a distância entre a cimenteira e a central de concretagem é de 300 km. O transporte de cimento a granel é realizado por modal rodoviário, em caminhões, a diesel, com capacidade superior a 32 toneladas.

b) Cinza de Casca de Arroz residual

A modelagem desse trabalho não considera o consumo energético da queima da casca do arroz, que gera a CCA residual. Assim, somente, o seu transporte entre a usina agroindustrial e a planta de produção de cimento foi analisado. Cabe salientar que foi desconsiderada a infraestrutura da indústria de moagem, considerando apenas o consumo de eletricidade para o beneficiamento (moagem).

A moagem proporciona a redução das partículas e conseqüentemente, o aumento da área superficial, fatores relevantes para o desenvolvimento das reações pozolânicas. Após estudar diferentes tempos de moagem para esta CCA residual, Righi (2015) concluiu que a moagem ultrafina em moinho vibratório por oito horas era o processo mais eficiente para obtenção de aditivos minerais com atividade pozolânica igual ou superior a 100%.

Cordeiro (2006) correlacionou o índice de trabalho obtido experimentalmente para cinza de casca de arroz residual com o consumo de energia elétrica para a moagem em um moinho de bolas industrial em circuito aberto e fechado. No presente trabalho, utilizou-se as estimativa de consumo energético para circuito fechado para o processo de moagem estudado, visto que esse tipo de circuito é o mais utilizado em escala industrial, conforme apresenta a **Tabela 13**.

Tabela 13 – Estimativa do consumo energético para moagem ultrafina em moinho de bolas industrial

Aditivo Mineral	Consumo energético (kWh/t)	
	Circuito Fechado	Circuito Aberto
Cinza de casca de arroz residual	150	250

Fonte: CORDEIRO (2006).

Como foi adotado neste estudo o circuito fechado, foi calculado o consumo energético em relação para cada tonelada. Como fluxo de referência foi escolhida de 1m³, foi transformado a unidade para kWh/m³, levando em consideração o peso específico da CCA residual que é 2,03 ton/m³, conforme descrito no subitem 4.2.2.

Sobre o transporte desta CCA residual, foi adotada uma distância de 500 km que foi calculada através do site <http://br.distanciacidades.com>, esta distância corresponde da cidade

onde está situada a indústria agroindustrial (Alegrete/RS) até a planta de produção de cimento (Porto Alegre/RS). Foi adotado o modal rodoviário, com transporte em caminhões a diesel com capacidade superior a 32 toneladas.

c) Agregados

Os agregados miúdos utilizados foram uma areia quastozosa com a classificação de areia fina e areia média. Já o agregado graúdo empregado foi uma brita basáltica do tipo 1. Na análise desse trabalho, foram utilizados dados de produção brasileiros de areia e brita do “berço-ao-portão”, obtidos no Ecoinvent v3.6. Nesse trabalho, foi considerada o transporte por 50 km, valor adotado por Rossi (2013) em seu trabalho sobre ACV de brita, em caminhões a diesel com capacidade de 16 a 32 toneladas.

c) Superplastificante

O aditivo superplastificante empregado foi o com base de cadeia de policarboxilato, com teor de sólidos de 40%. Este dado retirado do Ecoinvent v3.6 com origem global. Não foram encontradas informações sobre os locais de produção de superplastificantes no Brasil. Com isso, considerou-se a distância de 1000 km entre o fabricante e a central de concretagem, valor esse adotado por Celik *et al.* (2015), em modal rodoviário.

d) Fibra de Polipropileno

De acordo com a Marques *et al.* (2006), durante o processo de fabricação do polipropileno, inúmeras emissões atmosféricas são geradas, causando impactos ambientais como efeito estufa, diminuição da camada de ozônio, acidificação (chuva ácida), formação de ozônio a baixas altitudes e potencial de eutrofização. Empregou-se a base de dados Ecoinvent v.3.6, para obterem-se os impactos causados na etapa de fabricação do polipropileno (PP). Não foi encontrado nenhuma base de dados sobre o processo de fabricação da fibra de polipropileno, assim neste estudo foi decidido usar apenas a etapa de produção do PP como referência.

Foram determinadas as distâncias de transporte entre fabricação da fibra de polipropileno e a concreteira. Adotou-se como referência a fábrica de fibra de PP na cidade de Jacaraí/SP conforme os autores Marques *et al.* (2016) com a distância de 1.235 km até a concreteira em Porto Alegre/RS.

e) Produção dos ECCs e do concreto para pavimentação

De acordo inventário desenvolvido por Marceau *et al.* (2007), a produção de concreto em uma central de concretagem apresenta um gasto energético de 42 MJ/m³ de concreto, consumidos em pequenos transportes, caldeiras industriais e nos processos de dosagens e mistura do concreto, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14 – Consumo de energia em uma central de concretagem

Fonte	Local de Consumo	Quantidade (MJ/m³)
Diesel	Veículos leves: empilhadeiras, “pick-up”, etc	6,73
	Caldeiras industriais e aquecimento do edifício	10,09
Gás Natural	Caldeiras industriais e aquecimento do edifício	11,21
Eletricidade	Em toda a planta	14,81
	Total:	42,84

Fonte: MARCEAU *et al.* (2007).

De forma simplificada, no cenário 1, considerou-se o consumo total de energia em uma central de concretagem para a mistura do ECC e do concreto. A Tabela 15 apresenta os dados dos processos produtivos dos materiais que constituem os ECCs e o concreto para pavimentação. Além do processo produtivo, foi analisado o transporte entre as unidades produtivas e a central de concretagem. A Tabela 16 apresenta as distâncias utilizadas no estudo, bem como o processo do Ecoinvent que foi utilizado para caracterizar o transporte.

Tabela 15 – Processos produtivos dos materiais, com dados do *Ecoinvent*.

Material	Processoa do Ecoinvent	Localização
	v3.6	
Cimento	Market for cement, Portland cement, Portland Cutoff, U	Brasil (BR)
Areia	Market for sand	Brasil (BR)
Brita 1	Market for gravel, crushed	Brasil (BR)
Superplastificante	Market for polycarboxylates,	Global (GLO)

Fibra de Polipropileno	40% active substance Polypropylene production, granulate	Resto do mundo (ROW)
CCA	Electricity, medium voltage	Brasil (BR)
Água	Market for tap water	Brasil (BR)
Mistura	Electricity, medium voltage	Brasil (BR)

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 16 – Transporte dos materiais até a central de concretagem, com dados do Ecoinvent

Material	Distância (km)	Quantidade (toneladas)	Referência	Processo
Cimento	300		SNIC (2020)	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def, S
Areia	50		Rossi (2013)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def, S
Brita 1	50		Rossi (2013)	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def, S
Superplastificante	1.000		Celik et al. (2015)	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def, S
Fibra de Polipropileno	1.235		Marques <i>et al.</i> , (2016)	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def, S
CCA	500		Distância proposta neste estudo	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4 {GLO} market for Alloc Def, S
Água	0		-	-

Fonte: Autoria Própria.

3.4.2 Cenário 2: Uso como *Overlay* em Pavimentos

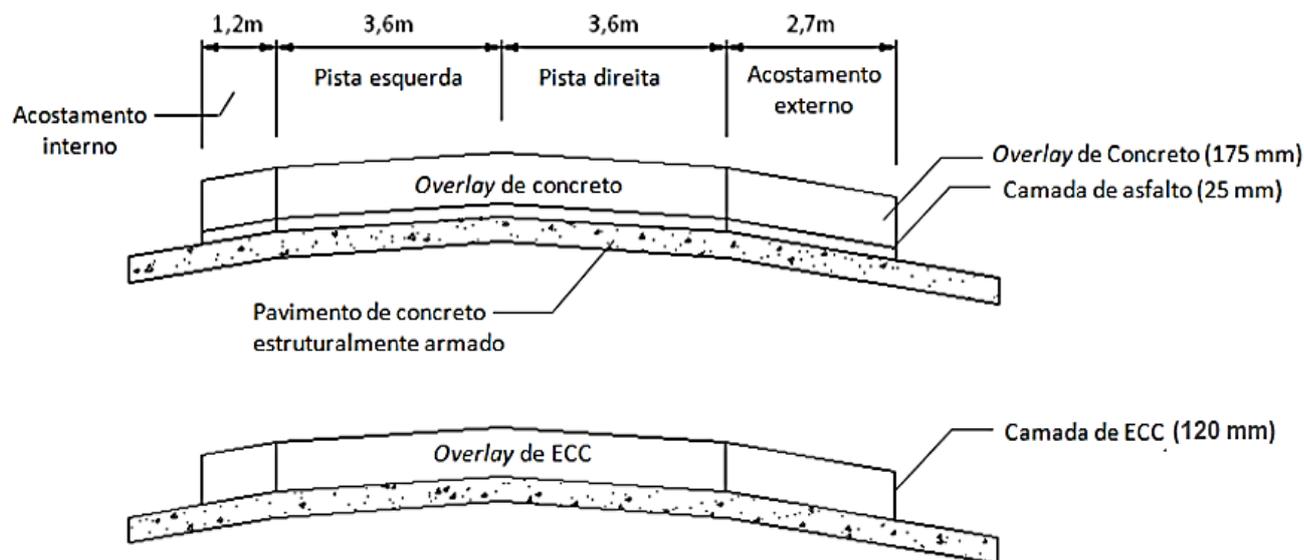
3.4.2.1 Objetivo e Escopo

Pavimentos e recapeamentos de concreto, quando bem projetados e executados, podem resultar em importantes ganhos em termos de sustentabilidade, em função da sua vida útil elevada, do reduzido custo ambiental dos materiais associados à sua fabricação. E do baixo consumo energético envolvido na sua produção e dos benefícios adicionais que podem ser obtidos durante as atividades de construção, manutenção e conservação/reabilitação que ocorrem ao longo de seu ciclo de vida (GARCEZ, 2009).

O objetivo do cenário 2 foi comparar os impactos ambientais potenciais da utilização do ECC com diferentes porcentagens de CCA como *overlay* (recapeamento) de pavimentos rígidos comparando com *overlay* de concreto rígido. Conforme estabelecido pela ISO 14040 (2014), a fase de “Definição do objetivo e escopo” inclui, ainda, a escolha da Unidade Funcional (UF) e definição dos limites do sistema. Neste caso, 1 km de *overlay* foi escolhido como a unidade funcional, enquanto que as delimitações do sistema incluem: o fornecimento dos materiais nas quantidades necessárias para produzir a unidade funcional escolhida; o consumo de energia por m³ de concreto e o uso da usina de concretagem; a fase de construção; a fase de uso com as manutenções previstas e o fim de vida da construção.

A Figura 47 ilustra a estrutura que recebeu a simulação da camada de *overlay* como ECC e como pavimento rígido, estes parâmetros de estrutura foram adotados baseados no trabalho de Garcez (2009). O trecho analisado é composto, em cada direção, por duas pistas de 3,6 m de largura, com acostamento à esquerda de 1,2 m de largura e acostamento à direita de 2,7 m. Foi considerado para o *overlay* de pavimento rígido uma espessura de 175 mm, e também sendo levado em consideração uma camada separadora de asfalto de 25 mm, para estabelecer uma condição de não aderência entre o pavimento antigo de asfalto e concreto novo. Para o *overlay* de ECC foi utilizada uma espessura de 120mm, conforme Garcez (2009) confirmou como melhores parâmetros.

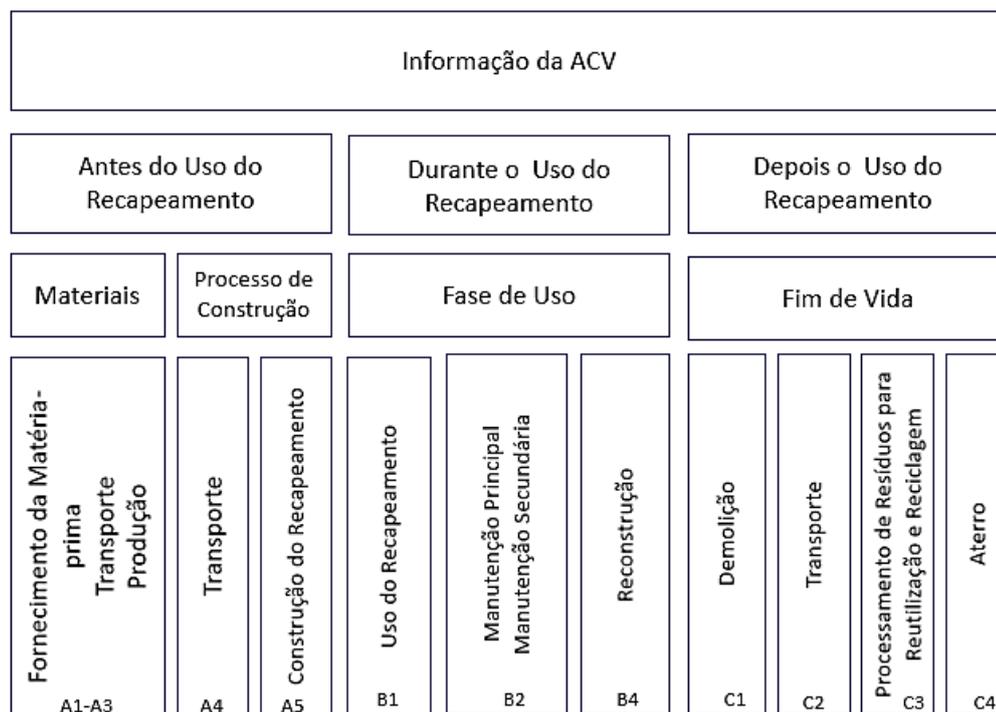
Figura 47 – Estrutura dos dois tipos de *overlay* em uma direção.



Fonte: Autoria Própria.

No cenário 2 o sistema de produto estudado considerou a fronteira do berço-ao-portão que já tinha sido considerada no cenário 1, acrescentando a fase de construção do *overlay*, fase de uso e fim da vida da construção. A Figura 48 ilustra as delimitações do sistema para o cenário 2.

Figura 48 – Sistema de produto do Cenário 2



Fonte: Autoria Própria.

3.4.2.2 Recursos na Fase de Construção

Para a fase construção do cenário 2 foi adotado um caminhão betoneira considerado o diesel utilizado para o uso deste caminhão, considerando o transporte da saída da concreteira até o local da construção considerando uma distância de 10 km. E também foi adotado recurso de eletricidade usada na vibração do concreto nos trechos construídos - Utilizado um vibrador de imersão com mangote de 4 m, agulha 0,45 m e motor de 1,5 HP, energia de 1,1 kwh.

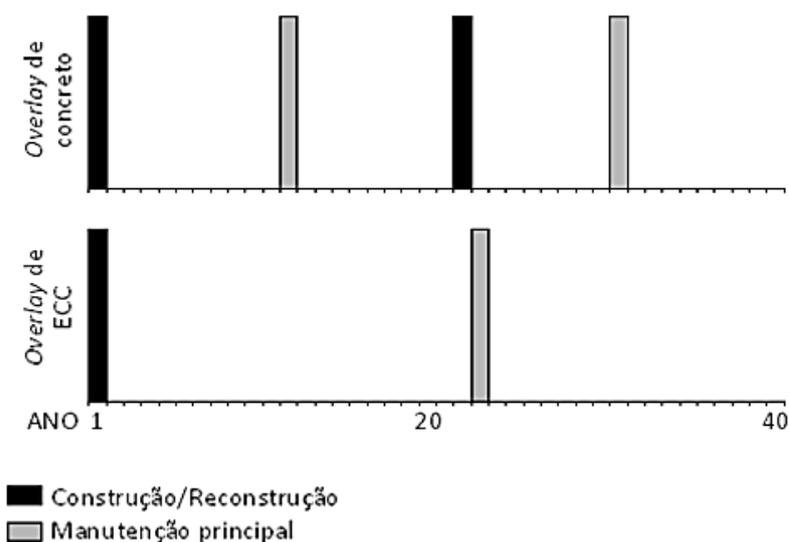
3.4.2.3 Recursos na Fase de Uso

O modelo de deterioração do ECC utilizado neste estudo foi desenvolvido com base no estudo proposto por Qian (2007). Já para o recapeamento em pavimento rígido foi adotado o modelo do Manual de Recuperação de pavimentos rígidos do DNIT, publicação IPR – 37. O manual recomenda que devem ser recuperados os defeitos mais graves observados em alguns trechos ou em todo o pavimento. A Figura 49 ilustra as manutenções adotadas para cada tipo

de *overlay*, onde o recapeamento de concreto está prevista duas manutenções e uma reconstrução, já o *overlay* de ECC está previsto uma manutenção a cada 25 anos.

Para a retirada dos trechos da pista com defeitos, foi utilizado uma britadeira de potência 1900 Watts e 1000 impactos/minuto. O transporte utilizado para a retirada do material e levado até a ONG Solidariedade que utiliza resíduos de concreto em blocos - caminhão basculante 6 m³, peso bruto total 16.000 kg, carga útil máxima 13.071 kg, distância entre eixos 4,80 m, potência 230 cv inclusive caçamba metálica - manutenção. Eletricidade usada na vibração do concreto nos trechos reconstruídos - Utilizado um vibrador de imersão com mangote de 4m, agulha 0,45m e motor de 1,5HP, energia de 1,1 kwh.

Figura 49 – Manutenções adotadas para cada tipo de *overlay*



Fonte: Autoria Própria.

3.4.2.4 Recursos na Fase de Fim de Vida

Após 40 anos de uso, está prevista a demolição do overlay com a utilização de uma retroescavadeira sobre rodas com carregadeira, tração 4x4, potência líq. 72 hp, caçamba carreg. cap. mín. 0,79 m³, caçamba retro cap. 0,18 m³, peso operacional mín. 7.140 kg, profundidade escavação máx. 4,50 m - neste caso foi levado em consideração apenas o uso do diesel para realização do serviço. O transporte utilizado para a retirada do material e levado até a ONG Solidariedade que utiliza resíduos de concreto em blocos - caminhão basculante 6 m³, peso bruto total 16.000 kg, carga útil máxima 13.071 kg, distância entre eixos 4,80 m, potência 230 cv inclusive caçamba metálica - manutenção.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

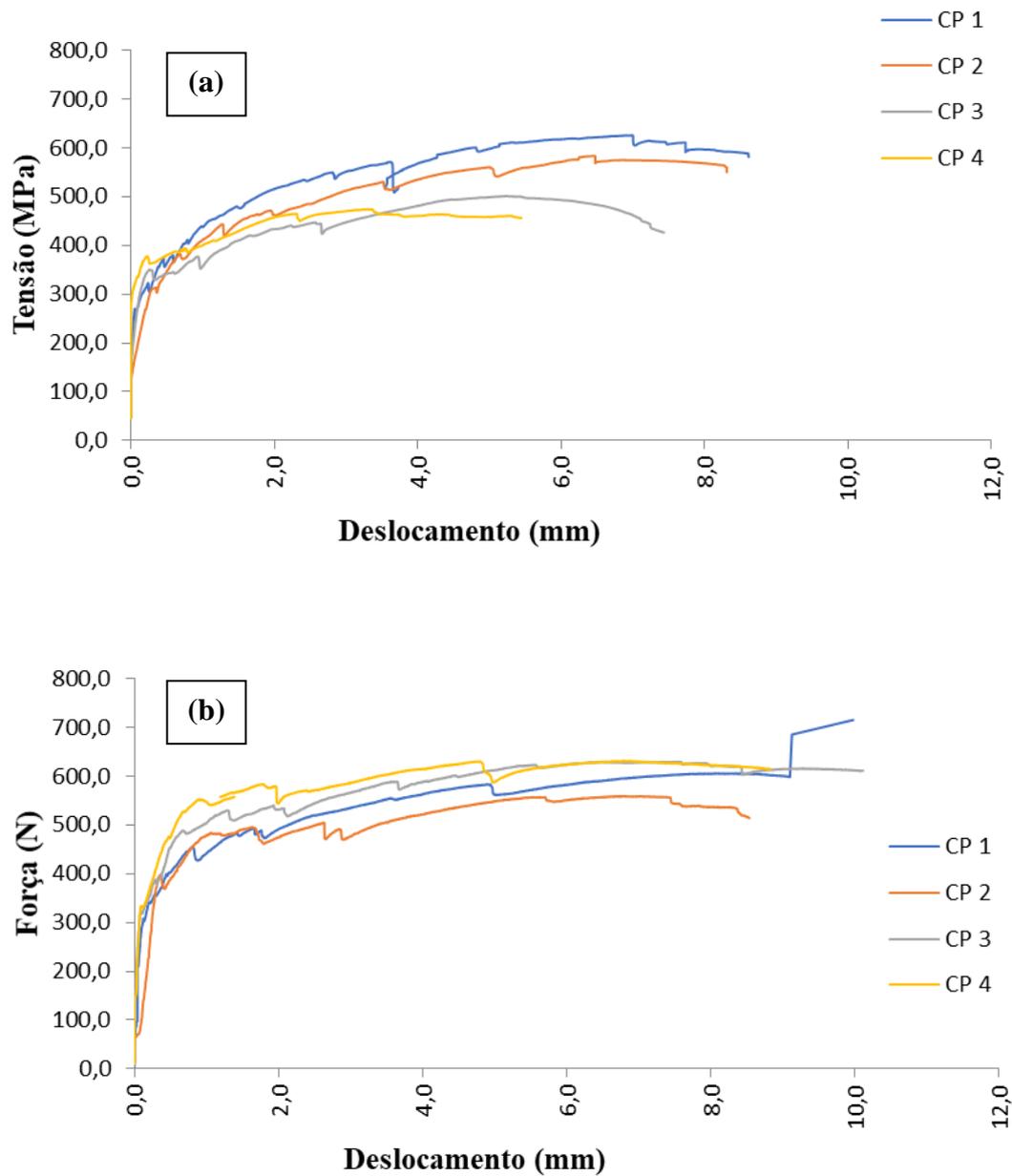
4.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DA PORCENTAGEM DE CCA

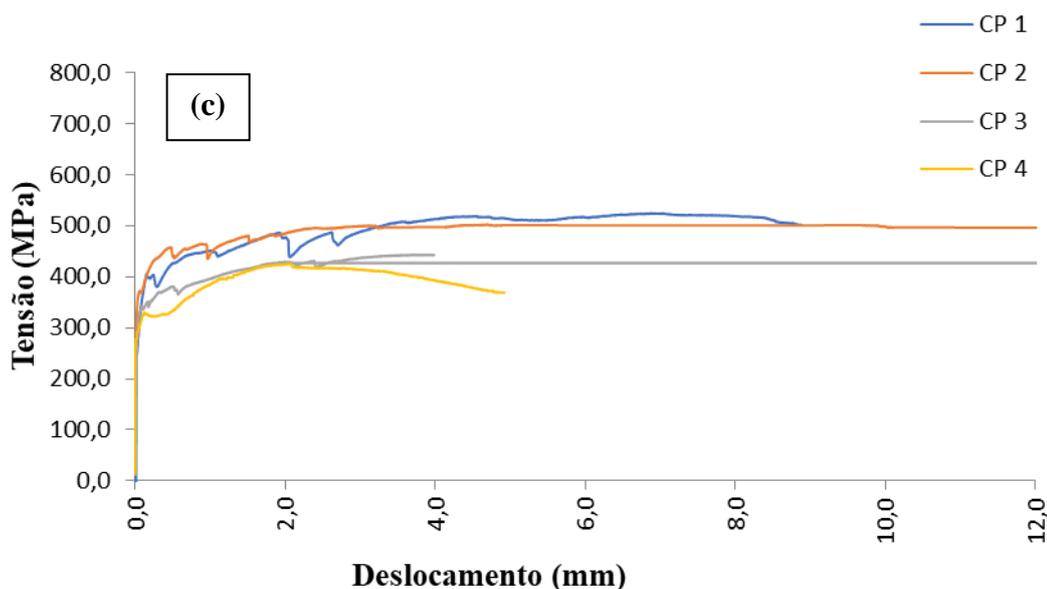
Neste subitem são apresentados os resultados da Etapa 1, os subitens compilam uma série de resultados mecânicos e de processos deteriorativos do ECC com o uso da cinza de casca de arroz residual para compreender quais as melhores aplicações para este material. O grande objetivo da etapa 1 foi determinar se o aumento da incorporação da cinza de casca de arroz de 30% para 50% e 70% melhora ou prejudica o comportamento mecânico dos ECCs e como o material responde a ensaios de processos deteriorativos.

4.1.1 Ensaio de Flexão à Quatro Pontos

A Figura 49 apresenta as curvas força x deslocamento para os traços de 30% de CCA (Figura 49a), 50% de CCA (Figura 49b) e 70% de CCA (Figura 49c). Para o traço com 30% de CCA residual (30ECC1), é possível perceber que todos os corpos de prova apresentaram um comportamento mecânico muito semelhante entre si. Fica evidenciado o comportamento *strain-hardening* após a abertura da primeira fissura e com isso o desenvolvimento da múltipla-fissuração. Este comportamento foi o mesmo encontrado por diversos autores como Li (2003); Garcez (2009); Yang *et al.* (2007). A flecha média obtida para o traço 30ECC1 ficou em torno de ± 7 mm caracterizando a elevada capacidade de deformação pós-pico de carregamento. O comportamento *strain-hardening* foi desenvolvido no traço 30ECC1, ou seja, ganho de resistência após a abertura da primeira fissura e o desenvolvimento da múltipla fissuração. Este mesmo tipo de comportamento mecânico para a porcentagem de 30% de CCA já foi estudado por Righi (2015), Pereira da Costa (2015) e Muñoz Rodriguez (2018). Novamente neste estudo se confirma a característica principal de um *engineered cementitious composites* (ECC).

Figura 49 – Curvas força x deslocamento (a) 30ECC 1 (b) 50ECC1 (c) 70ECC1





Fonte: Autoria Própria.

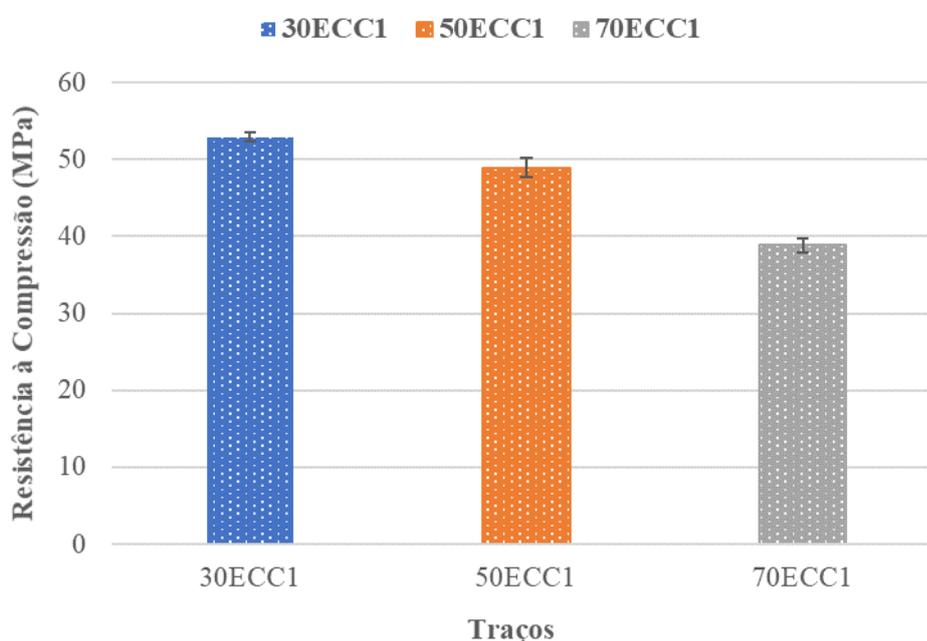
O traço de 50ECC1 também obteve uma uniformidade entre os corpos de prova, garantindo a confiabilidade nos resultados. Analisando o traço com 50% de CCA (50ECC1) com o traço de 30% de CCA (30ECC1) é possível notar que o traço 50ECC1 possui deslocamentos muito semelhantes ao traço 30ECC1, em torno de 8mm, e que o comportamento *strain-hardening* fica muito evidente neste traço. O processo de costura gerado pelas fibras permitiu que o comportamento de múltipla fissuração. Para o traço 50ECC1 o comportamento *strain-hardening* é o mais evidente entre os três traços estudados, com um desenvolvimento da múltipla-fissuração e com ganhos de deslocamento na ordem de 8mm em todos os corpos de prova. Já o traço 70ECC1 mostrou uma leve queda da força aplicada em relação os demais traços, mas a múltipla fissuração e o comportamento *strain-hardening* foi desenvolvido.

A porcentagem de 70% de CCA residual (Figura 49c) apresentou um comportamento levemente inferior aos demais traços estudados. Após o aparecimento da primeira fissura, o processo de múltipla fissuração ficou bem evidente em todos os corpos de prova mas após deslocamento de 5 mm iniciou uma estabilização sem maiores ganhos de força e o desenvolvimento da múltipla fissuração ficou menos visível.

4.1.2 Ensaio de Resistência à Compressão

A Figura 50 apresenta os valores médios de cinco corpos de provas para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de idade. Nota-se que a medida que se aumentou a porcentagem de CCA houve um decréscimo de resistência. Também é possível perceber que não houve uma grande variabilidade nos resultados de cada traço, pois obteve um coeficiente de desvio-padrão baixo.

Figura 50 – Resultados de resistência à compressão



Fonte: Autoria Própria.

O traço 70ECC1 obteve uma redução da resistência de 26,62% ao ser comparado ao traço 30ECC1 e uma redução de 20,62% para traço 50ECC1. O trabalho de Oliveira (2016) que estudou diferentes misturas com sílica ativa no ECC, também encontrou resultados inferiores de resistência à compressão conforme houve o aumento de sílica ativa. Sabe-se que porcentagens altas (acima de 50%) de materiais suplementares cimentícios necessitam de idades mais avançadas para que a reação pozolânica ocorra. Como a cinza de casca de arroz residual utilizada neste trabalho, aos 28 dias de idade apresentou um alto índice de atividade pozolânica conforme o item 4.2.2, se optou por realizar ensaios somente aos 28 dias de idade.

Para verificar se realmente há influência do aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz aos 28 dias de idade, a Tabela 17 confirma estatisticamente, através da análise de

variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F consideravelmente maior que o valor de $F_{crítico}$. Cabe lembrar que para que as médias sejam consideradas iguais, é necessário que o valor de F seja menor que o $F_{crítico}$. Assim é possível constatar que para o ensaio de resistência à compressão o aumento da porcentagem de substituição do cimento por cinza de casca de arroz sem controle de queima influencia nos resultados.

Tabela 17 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto à resistência à compressão.

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
	Entre grupos	527,6295	2	263,8147	171,1101	1,51164E-09	3,885294
Efeito do aumento da CCA	Dentro dos grupos	18,5014	12	1,541783			
	Total	546,1309	14				

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

Fonte: Autoria Própria.

4.1.3 Módulo de Elasticidade

A Tabela 18 apresenta o resultado de módulo de elasticidade dos traços com 30%, 50% e 70% de CCA residual. Como demonstrado nos resultados de resistência à compressão, a medida que houve o aumento da substituição de cimento por cinza de casca de arroz residual, ocorreu uma diminuição do valor de módulo de elasticidade. A norma NBR 8522 (2017) menciona que se o coeficiente de variância for acima de 5%, o corpo de prova deverá ser descartado, fato que não ocasionou para nenhum compósito.

Tabela 18 – Resultados de módulo de elasticidade dos traços da fase 1

TRAÇO	Corpo de Prova	E (GPa)	MÉDIA	DP	CV (%)
	CP1	22,92			
30ECC1	CP2	22,32	22,71	0,26	1,15
	CP3	22,90			

	CP1	20,94			
50ECC1	CP2	22,58	21,35	0,82	3,84
	CP3	20,54			
	CP1	17,31			
70ECC1	CP2	16,71	17,16	0,29	1,73
	CP3	17,46			

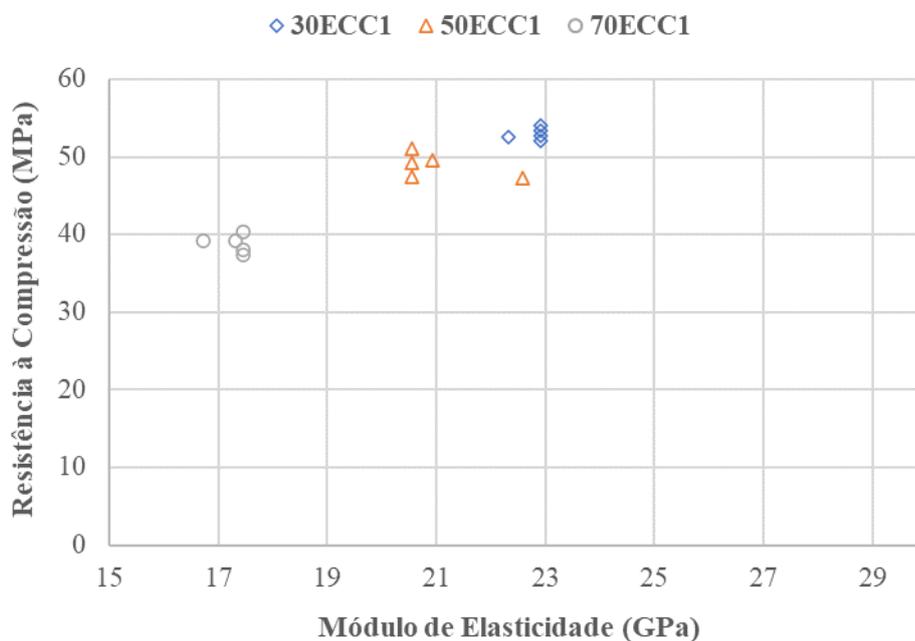
Onde: DP = Desvio-padrão médio; CV = Coeficiente de variância

Fonte: Autoria Própria.

O traço 70ECC1 obteve o menor resultado de módulo, com uma redução de 24,43% em relação ao traço 30ECC1 e uma redução de 19,62% para o traço 50ECC1. A reação pozolânica que ocorre devido ao uso de materiais cimentícios suplementares como o caso da cinza de casca de arroz, reage principalmente com o hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ formando na hidratação os silicatos de cálcio hidratados secundários (C-S-H) (TRINDADE, 2011).

Quando ocorre a redução do consumo de cimento devido ao aumento de substituição por cinza de casca de arroz, há uma diminuição da formação do hidróxido de cálcio e conseqüentemente não há hidróxidos de cálcio livres para combinarem com o óxido de sílcio (SiO_2) para a formação do C-S-H secundário, que é o responsável pelo aumento de resistência quando adicionado materiais pozolânicos. Acredita-se que teores elevados de cinza de casca de arroz sem controle de queima esteja com uma parcela atuando como material amorfo que combina com a quantidade de hidróxido de cálcio disponível e outra parcela esteja atuando apenas como fíller na matriz do ECC. A Figura 51 correlaciona a resistência à compressão com o módulo de elasticidade dos compósitos estudados na fase 1 deste trabalho.

Figura 51 – Resistência à compressão versus módulo de elasticidade



Fonte: Autoria Própria.

É possível perceber que conforme se tem o aumento do teor de substituição de cimento por CCA residual ocorre uma diminuição do desempenho mecânico dos ECCs. Novamente acredita-se que grande parcela do teor de cinza de casca de arroz esteja apenas atuando como efeito filler devido a possuir um diâmetro de partícula da ordem de 3 vezes menor do que o diâmetro do cimento, conforme pode ser visto no item 4.2 desta tese.

Foi verificado também se há influência entre os traços estudados em relação ao ensaio de módulo de elasticidade. A Tabela 19 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F maior que o valor de F crítico, demonstrando que para o ensaio de módulo de elasticidade há diferença significativa entre os traços de ECC.

Tabela 19 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto ao Módulo de Elasticidade.

Fator	Fonte da	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
	variação						
Efeito do aumento da CCA	Entre grupos	50,21354	2	25,10677	52,05156	0,000162	5,143253
	Dentro dos grupos	2,894065	6	0,482344			
	Total	53,1076	8				

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

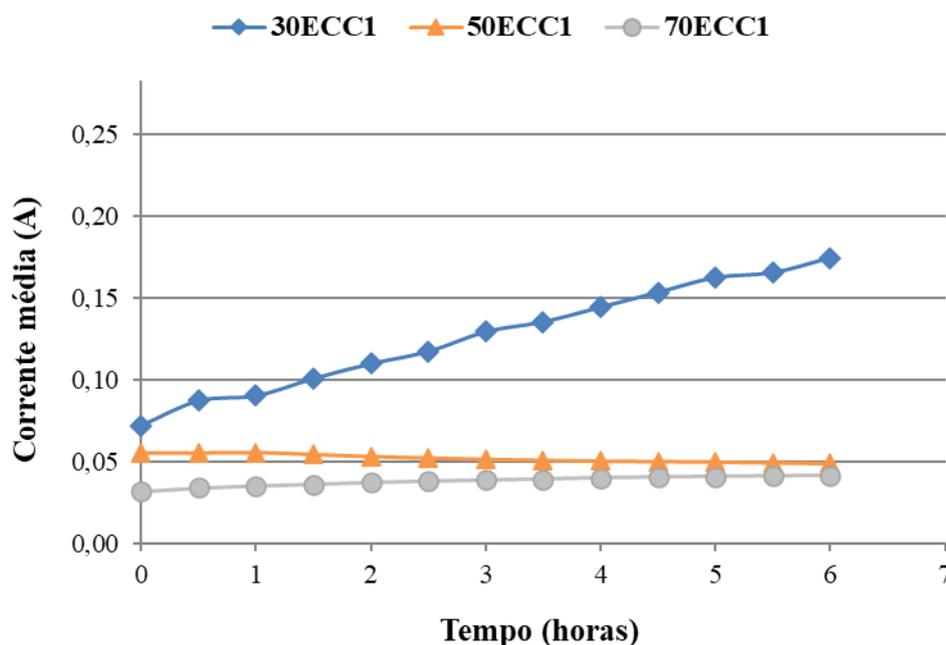
Fonte: Autoria Própria.

4.1.4 Ensaio de Penetração de Íons Cloretos

O ensaio de penetração de íons cloretos pelo método acelerado consiste basicamente em um teste de migração elétrica em estado estacionário, onde as medições são realizadas antes que o mesmo seja atingido, durando um período total de 6 horas (PEREIRA DA COSTA, 2015).

A Figura 52 ilustra o gráfico das correntes médias em função do tempo, obtidas por meio da diferença de potencial aplicada nos corpos de prova, conforme descrito no item 4.3.2.5 desta tese. É possível perceber que conforme houve o aumento da incorporação de cinza de casca de arroz ocorreu uma diminuição da corrente média, demonstrando que o aumento da CCA favorece positivamente em termos de penetração de íons cloretos.

Figura 52 – Correntes médias (A) obtidas no ensaio de penetração de íons cloretos



Fonte: Autoria Própria.

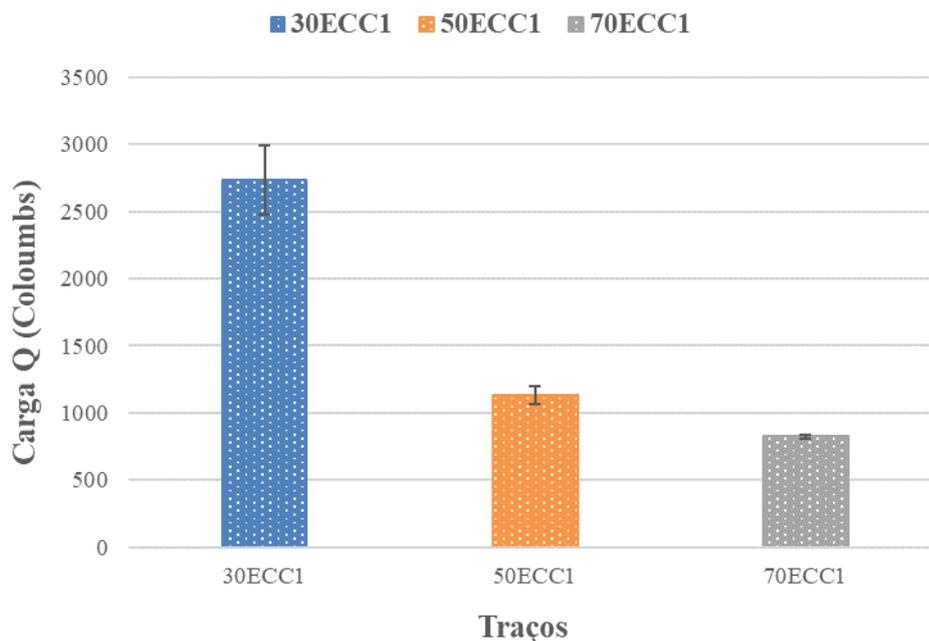
As cargas Q calculadas através das correntes médias (Equação 3), fornecem através de uma tabela proposta pela ASTM C1202 (2012), indicações qualitativas quanto ao risco de penetração de íons cloretos pelo método acelerado. A Tabela 20 ilustra os valores médios calculados e o risco de penetração correspondente para cada traço estudado. A Figura 533 apresenta as cargas médias em forma de gráfico, permitindo uma melhor comparação entre os resultados.

Tabela 20 – Cargas Q médias e avaliação qualitativa da penetrabilidade de íons cloreto segundo a ASTM C1202

Traço	Descrição	Carga Q (Columbs)	SD	CV(%)	Risco
30ECC1	30% CCA	2734,575	258,052	9,437	Moderado
50ECC1	50% CCA	1128,053	66,624	5,906	Baixo
70ECC1	70% CCA	824,759	15,255	1,850	Muito Baixo

Fonte: Autoria Própria.

Figura 53 – Cargas médias (Coulombs) obtidas no ensaio de penetração de cloretos



Fonte: Autoria Própria.

Segundo a norma ASTM C1202 (2012) é possível analisar qualitativamente que o fato do aumento da incorporação de cinza de casca de arroz de 30% para 70%, o risco de penetração de íons cloretos muda de moderado para muito baixo. Com esse incremento de CCA também ocorreu a redução da corrente total e da carga elétrica do traço 30ECC1 para o traço 70ECC1 de aproximadamente 70%.

Pereira da Costa (2015) menciona que o uso da cinza de casca de arroz reduz a penetração de íons cloretos devido a estrutura de poros do ECC. A autora constatou uma possível descontinuidade e tortuosidade da redes de poros devido ao uso da cinza. E ainda menciona outros fatores devem ser considerados, como a diminuição da quantidade de cimento e a provável capacidade de combinação de cloretos do compósito, devido ao teor de alumina reativa presente na pozolana, gerando a formação do sal de Friedel.

Ao avaliar o traço 50ECC1 com o traço 70ECC1 observa-se uma redução de carga elétrica e corrente total de aproximadamente 26,95%. Para verificar se realmente há influência do aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz a Tabela 21 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, para ambos os casos, obteve-se um valor de F consideravelmente maior que o valor de $F_{crítico}$. As análises foram feitas com base nos resultados de carga elétrica. Cabe lembrar que para que as médias sejam consideradas iguais, é necessário que o valor de F seja menor que o $F_{crítico}$. Assim é possível constatar que para o

ensaio de penetração de íons cloretos o aumento da porcentagem de substituição do cimento por cinza de casca de arroz influência nos resultados.

Tabela 21 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto à carga elétrica (ensaio de penetração de íons cloreto)

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Efeito do aumento da CCA	Entre grupos	4941269	2	2470634	1543,036	3,02649E-05	9,552094
	Dentro dos grupos	4803,453	3	1601,151			
	Total	4946072	5				

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

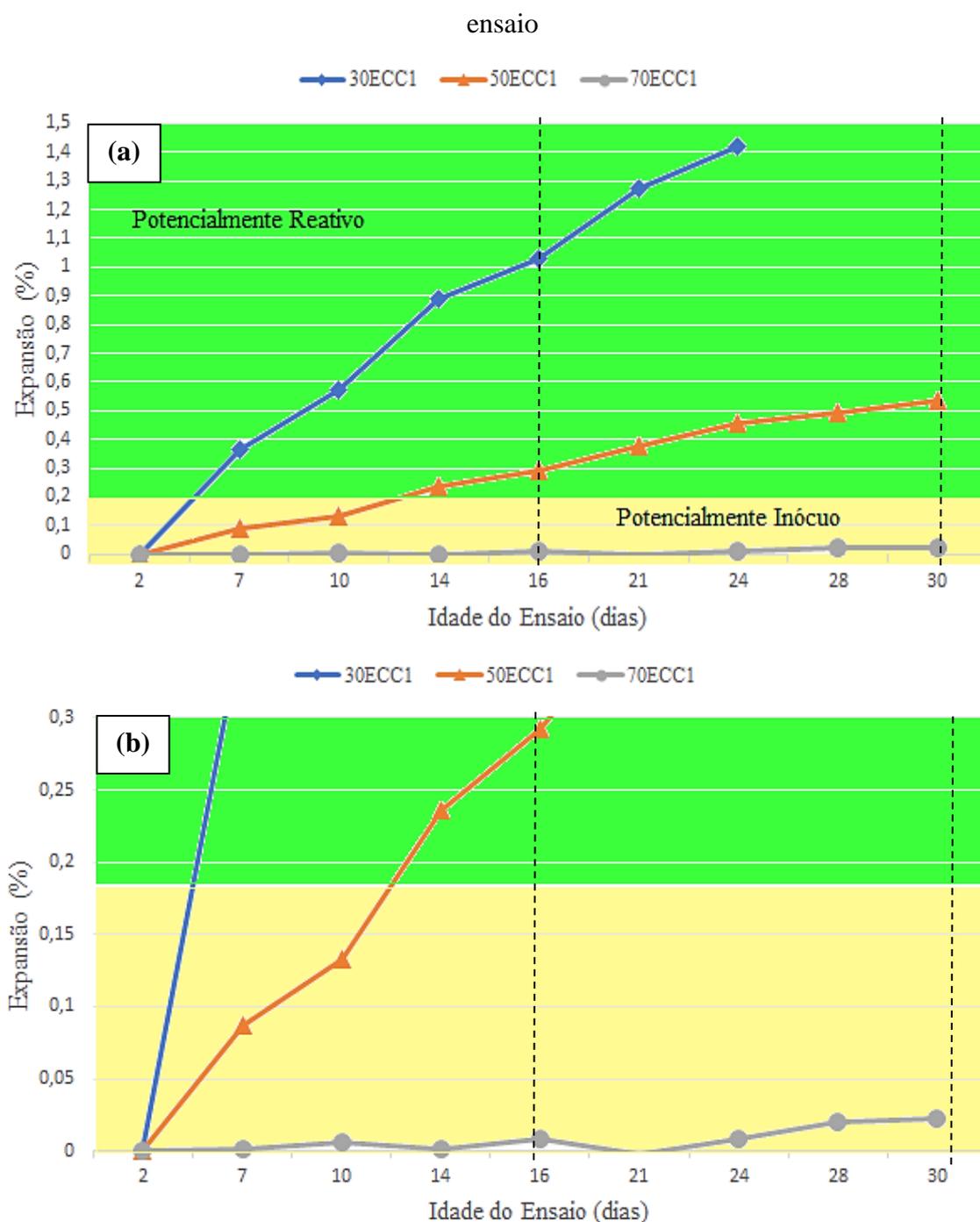
Fonte: Autoria Própria.

4.1.5 Ensaio de Reação Álcali-Sílica

A Figura 54 ilustra a evolução durante o tempo da variação linear média das barras de ECC que passaram pelo ensaio acelerado (NBR 15577-4/5, 2018), com a expansão máxima (Figura 54a) e zoom mais aproximado do ensaio (Figura 54b). A Tabela 23 apresenta a classificação dos compósitos, segundo o ensaio de reatividade acelerado frente à RAS conforme a NBR 15577 (2018). Observa-se que o traço 30ECC1 foi o traço que ocorreu maiores reações de expansão, ao ponto que não foi possível realizar o ensaio até o idade de 30 dias como recomendado pela NBR 15577 (2018).

Aos 24 dias de ensaio não foi possível realizar as medições de expansão pois nenhum dos três corpos de prova encaixavam no relógio comparador. Segundo a NBR 15577- parte 5 (2018), aos 16 dias para ser considerado como um ECC inócuo, a expansão média não pode ultrapassar 0,10% e aos 30 dias para ser considerado um material inócuo não pode ultrapassar o limite de 0,19%. Os gráficos da Figura 54 estão pintados de duas cores, a cor amarela significa a faixa inócua e a cor verde significa a faixa reativa.

Figura 54 – Reatividade potencial dos traços com cinza de arroz (a) Expansão máxima (b) Zoom mais aproximado do



Fonte: Autoria Própria.

Para o traço 30ECC1 nota-se que a partir de 5 dias de ensaio, este traço já estava com valores de expansão acima do permitido pela NBR 15577 (2018). O traço 50ECC1 também a partir dos 14 dias de ensaio já ultrapassava o limite máximo da norma. Já o traço 70ECC1 não houve expansão superior ao permitido pela norma brasileira, sendo o único traço inócuo, ou

seja, não reativo. Trindade (2011) em seu estudo avaliou a reação álcali-sílica da cinza de casca de arroz sem controle de queima moída em laboratório na proporção de 15% de substituição ao cimento que também expandiu acima do estabelecido pela NBR 15577 (2018).

O autor acredita que este comportamento tenha ocorrido devido pelo efeito de floculação da CCA na mistura, pois o teor de 15% de CCA não caracteriza uma alta porcentagem de sílica disponível na amostra para que reagisse. O mesmo autor no ano de 2015, testou maiores teores de substituição de cimento por CCA sem controle de queima, aumentando os teores para 25% e 50%. Os resultados encontrados por Trindade (2015) demonstraram que até o teor de 25% houve expansão acima do permitido por norma mas que para o teor de 50% não houve expansões acima do permitido pela norma brasileira. O aumento de 25% para 50% de CCA ocasionou uma redução da expansão álcali-sílica tornando as argamassas inócuas, comportamento semelhante ao encontrado para o traço com 70% de cinza de casca de arroz sem controle de queima deste trabalho.

A Tabela 22 demonstra os valores de expansão para as idades de 16 e 30 dias de ensaio e a classificação da potencialidade de reação das misturas de ECC, e é possível perceber que apenas o traço 70ECC1 ficou classificado como material inócuo, ou seja, que não reagiu.

Tabela 22 – Expansão média e classificação da potencialidade reativa aos 16 e 30 dias dos compósitos

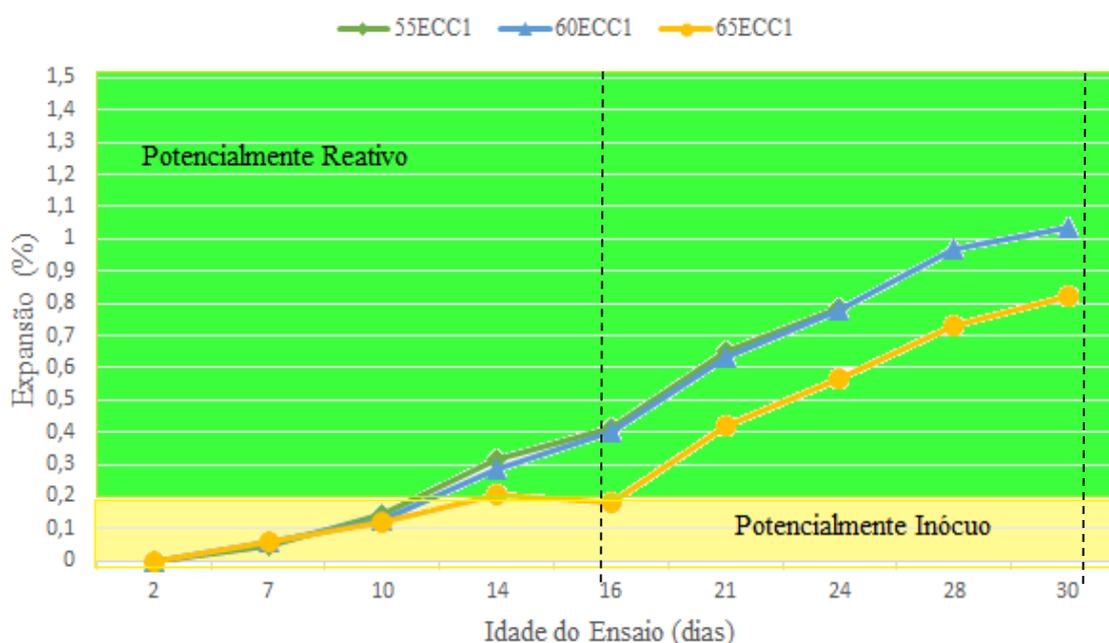
Mistura	Expansão	Classificação	Expansão	Classificação
	Média (%)	NBR 15577/5	Média (%)	NBR 15575/4
	16 dias	0,10%	30 dias	0,19%
30ECC1	1,0272	REATIVO	-	REATIVO
50ECC1	0,2916	REATIVO	0,5324	REATIVO
70ECC1	0,0088	INÓCUO	0,0223	INÓCUO

Fonte: Autoria Própria.

Sahmaran e Li (2008) realizaram este mesmo ensaio para misturas de ECC contendo cinza volante numa porcentagem de aproximadamente 55% e seus resultados demonstraram que não houve reação álcali-sílica para este tipo de ECC com cinza volante. Os autores ainda afirmam que esse tipo de reação no ECC pode estar correlacionado a outras variáveis como por exemplo o diâmetro da areia utilizado e/ou o diâmetro do cimento e o uso de microfibras e não necessariamente esteja correlacionado com o uso de altos teores de material cimentício suplementar, como o caso de cinza volante e cinza de casca de arroz, por exemplo.

Como forma de compreender melhor este fenômeno da reação álcali-sílica nos ECCs com cinza de casca de arroz residual, este ensaio foi repetido para porcentagens de substituição no intervalo de 50% a 70%, assim foi realizado novamente com as porcentagens de 55%, 60% e 65%, conforme a Figura 55.

Figura 55 – Reatividade Potencial dos traços com cinza de casca de arroz nas porcentagens de 55%, 60% e 65%



Fonte: Autoria Própria.

Pode-se perceber que o para as novas porcentagens estudadas, nenhuma ficou como potencialmente inócuo. O traço com 65% de substituição até 16 dias de ensaio ficou no limite estabelecido pela NBR 15577- Parte 5 (2018) que é de 0,19%, após a continuidade do ensaios, todas as amostras ficaram classificadas como potencialmente reativas.

Uma outra hipótese levantada neste trabalho é que a porcentagem de substituição de 70% de cimento por cinza de casca de arroz residual, diminuiu drasticamente o consumo de cimento das misturas de ECC e conseqüentemente diminuiu a quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reagir com o óxido de sílcio (SiO_2) que contém na cinza de casca de arroz residual. Uma das principais desvantagens do uso das adições pozolânicas está no consumo parcial ou total do hidróxido de cálcio com conseqüente diminuição do pH da solução dos poros o que pode ocasionar numa carbonatação acelerada (ZHANG *et al.*, 2000).

Filho (2008) em seu trabalho definiu parâmetros para calcular a quantidade de hidróxido de cálcio necessário para a utilização de materiais cimentícios suplementares como o caso da cinza de casca de arroz residual. Em seu estudo o autor concluiu que aos 91 dias, o cimento CP V-Ari produz 32% de hidróxido de cálcio numa mistura de pasta de cimento. Realizando uma suposição teórica de qual seria a porcentagem de produção do hidróxido de cálcio para as misturas de ECCs para todas as porcentagens estudadas tem-se a Tabela 23.

Tabela 23 – Produção hipotética do hidróxido de cálcio

Misturas	Hidróxido de Cálcio	CCA	Ca(OH)₂/CCA
Cimento CP V ARI	32,00 %	-	-
70% Cimento e 30% CCA	22,40 %	30 %	0,75
50% de Cimento e 50% CCA	16,00 %	50 %	0,32
45% de Cimento e 55% CCA	14,40 %	55 %	0,26
40% de Cimento e 60% CCA	12,80 %	60 %	0,21
35% de Cimento e 65% CCA	11,20 %	65 %	0,17
30% de Cimento e 70% CCA	9,60 %	70 %	0,14

Fonte: Autoria Própria.

É notável a diminuição progressiva da produção de hidróxido de cálcio conforme se aumenta o teor de substituição do cimento pela cinza de casca de arroz residual, hipoteticamente. Filho (2008) em seu trabalho mencionou que a produção de hidróxido de cálcio em 32% é responsável por manter o pH do concreto altamente alcalino.

Como pode-se observar na Tabela 23 é que a proporção de hidróxido de cálcio para com a CCA residual, diminui conforme se aumenta o teor de substituição, provavelmente fazendo com que a CCA residual atue mais como um efeito fíller do que um efeito pozolânico nas misturas de ECC. Além de se produzir um valor mais baixo de hidróxido de cálcio, o mesmo

será ainda consumido na reação pozolânica, baixando o pH e deixando suscetível a carbonatação.

As pozolanas quando reagem com o hidróxido de cálcio presente na zona de transição da matriz formam sílico-aluminatos de cálcio hidratado, modificando a estrutura da matriz cimentícia. A alteração microestrutural por atividade pozolânica da CCA substitui a portlandita, composto químico lixiviável, por hidratos estáveis à ação da água. Como resultado há o refinamento dos poros, aumento da tortuosidade da rede capilar e, sobretudo, densificação da zona de transição, melhorando o desempenho do concreto frente à maioria das ações deletérias a que estará exposto (ISAIA, 1995; PAULON, 2005; VEDALAKSHMI *et al.*, 2003).

Apesar das melhorias microestruturais devido à pozolana serem significativas, com redução da permeabilidade da matriz ao ar e à água, elementos fundamentais para as reações de oxidação do ferro, a velocidade com que o anidrido carbônico difunde-se para o interior da matriz não é diminuída na mesma proporção, acarretando um maior avanço da frente de carbonatação para um mesmo intervalo de tempo (FILHO, 2008).

Em se tratando da reação álcali-sílica que também possui interação com o hidróxido de cálcio, depende da velocidade de reação da concentração dos hidróxidos alcalinos na mistura. Os íons cálcio (Ca^{2+}), cuja fonte principal é a portlandita (hidróxido de cálcio) formada pelas reações de hidratação do cimento penetram rapidamente no gel, dando origem a geles de silicatos de cálcio, sódio e potássio. Estes geles são capazes de absorver moléculas de água e expandir, gerando forças expansivas (REIS E SILVA, 1997; SICHIERI *et al.*, 2008).

Estas forças expansivas dependem da reação entre os hidróxidos alcalinos solubilizados na fase líquida dos poros dos concretos e alguns agregados reativos. É uma reação lenta e resulta em um gel que, ao se acumular em vazios da matriz e na interface pasta-agregado, na presença de água, se expande, exercendo pressão interna no material. Ao exceder a resistência à tração, a pressão interna pode promover fissurações. A reação álcali-agregado requer a atuação conjunta de água, agregado reativo e álcalis.

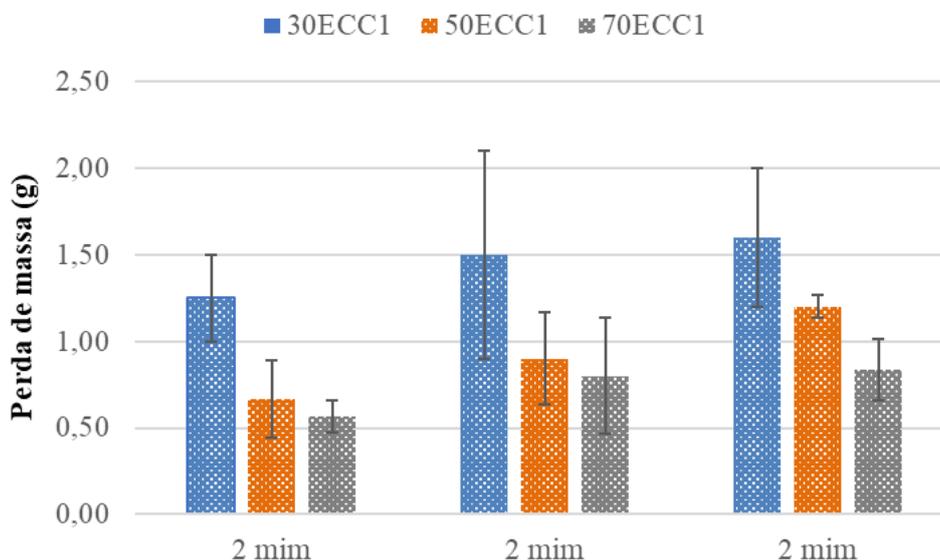
Estudos demonstraram que o uso de materiais pozolânicos em conjunto com o cimento também se caracteriza por combinar, quimicamente, uma quantidade maior de álcalis (sódio e potássio), reduzindo o risco de reação álcali-agregado, além de melhorar o desempenho frente ao ataque por sulfatos (BERRY *et al.*, 1994; WCZELIK, 2001). Fato este que pode explicar o motivo do traço 70ECC ter sido o único traço com resultado inócuo, ou seja, não reativo, na tabela é possível perceber que a produção do hidróxido de cálcio cai de 32% para 9,60%.

Ainda destes 9,60% uma parcela de aproximadamente 84% deverá ser consumido na reação pozolânica, deixando uma baixa concentração de hidróxido de cálcio solubilizados para combinar com sílicas reativas para gerar a reação álcali-sílica. Fato que também deve ser levado em consideração é a alta capacidade de carbonatação precoce devido a baixa produção do hidróxido de cálcio.

4.1.5 Resistência ao Desgaste Abrasivo

A Figura 56 ilustra a perda de massa dos corpos de prova de ECC. Este ensaio seguiu as recomendações da norma americana ASTM C944 (2019). A norma prevê que os cps sejam submetidos ao desgaste abrasivo com uma carga 197N aplicada em intervalos de 2 minutos. É possível observar que o traço 30ECC1 apresentou a maior perda de massa conforme foi aumentando o tempo de exposição ao desgaste abrasivo. Os traços 50ECC1 e 70ECC1 apresentaram perdas de massas muito semelhantes entre si, ao ser analisado os desvios-padrões de cada traço.

Figura 56 – Perda de massa dos corpos de prova de ECC

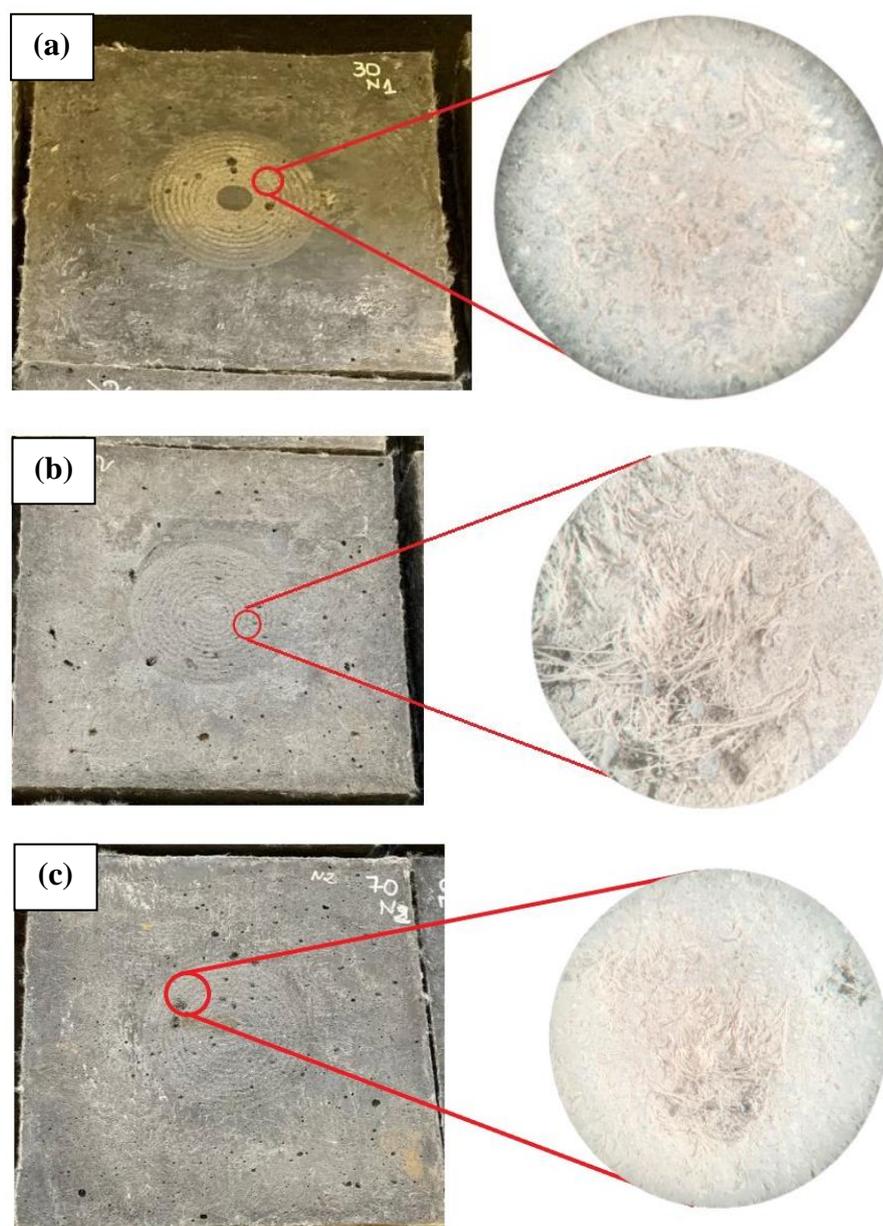


Fonte: Autoria Própria.

As áreas desgastadas dos ECCs foram examinados após ao final dos três tempos de exposição ao desgaste abrasivo por 2 minutos cada, conforme Figura 57, para 30ECC1 (Figura 57a), 50ECC1 (Figura 57b) e 70ECC1 (Figura 57c). A superfície da área desgastada também foi ampliada para mostrar mais detalhes. É possível perceber que para todos os traços

apenas uma poeira foi gerada durante o teste de abrasão, isto se deve as misturas não possuírem nenhum agregado graúdo. Os autores Wu *et. al.* (2018) também encontraram um comportamento muito semelhante ao deste estudo, onde somente pequenos fragmentos de ECC em forma de poeira foi desgastado neste ensaio. Os autores ainda relatam que este tipo de pavimento se torna uma solução segura para pistas de aeroportos por exemplo, devido a sua elevada resistência ao desgaste e também por outras propriedades mecânicas como a resistência à flexão quando comparável ao concreto rígido.

Figura 57 – Desgaste das superfícies e o aumento em 8x (a) 30ECC1, (b) 50ECC1 e (c) 70ECC1

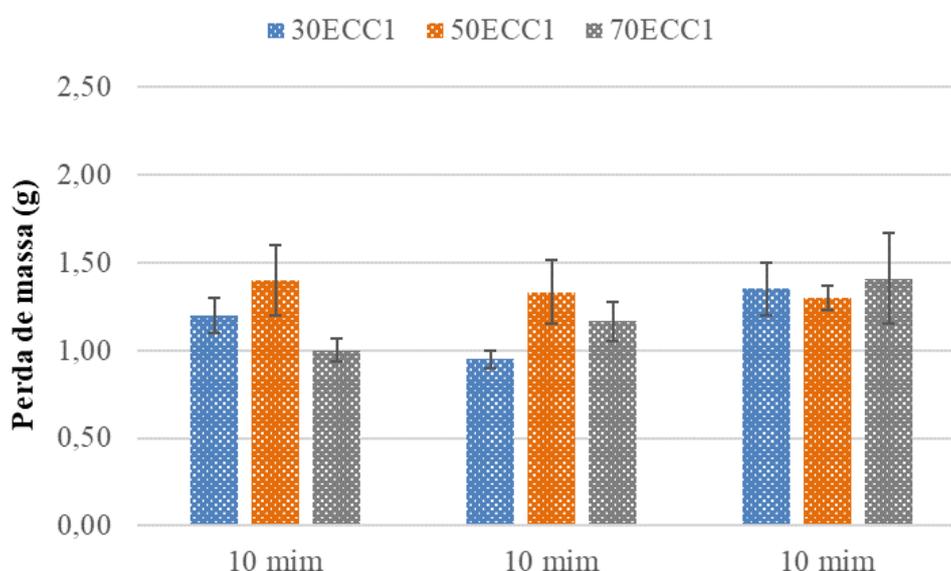


Fonte: Autoria Própria.

Também é possível notar um desgaste das fibras de polipropileno que foram expostas a superfície desgastada, mas não foi possível observar um desprendimento das mesmas. Outro ponto que é possível perceber é a distribuição uniforme das fibras, induzindo a boa dispersão deste tipo de fibra na matriz cimentícia.

Com o intuito de compreender melhor o desgaste abrasivo dos ECCs com cinza de casca de arroz residual, foi proposto neste estudo aumentar o tempo de exposição a rotação com o peso de 197N por 10 minutos interrompidos, seguindo os mesmos protocolos da norma americana ASTM C944 (2019), com intervalos de 3 tempos. A Figura 58 ilustra a perda de massa dos três traços estudados nesta pesquisa.

Figura 58 – Perda de massa dos três traços estudados



Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que o traço 30ECC1 obteve ao segundo tempo de exposição de 10 minutos uma diminuição quando comparado aos demais tempos. Já os traços de 50ECC1 e 70ECC1 novamente obtiveram comportamentos semelhantes entre si. Mesmo aumentando o tempo de exposição ao desgaste o comportamento foi similar aos tempos de 2 minutos conforme recomendações da norma americana.

Outro ponto que pode ser observado é que mesmo aumentando o tempo de exposição ao desgaste, as forças de abrasão ainda são moderadamente baixas para afetar a superfície. Abid *et. al.* (2018) desenvolveram um protótipo para realização do ensaio de desgaste abrasivo do ECC com fibra de PVA com o uso de jato de água. Mesmo sendo realizado um método distinto os autores também obtiveram resultados semelhantes sobre a forma de

Influência De Altos Teores De Cinza De Casca De Arroz Nas Propriedades Reológicas, Mecânicas E De Durabilidade Nos Engineered Cementitious Composites (ECC)

desgaste e a resistência das fibras na matriz cimentícia. Outro ponto que os autores comentam é o tempo de exposição de mais de 3 horas contínuas, também não proporcionou um desprendimento de fragmentos dos corpos de prova, mantendo a superfície levemente desgastada e uma exposição das fibras de PVA sem o desprendimento das mesmas.

Para verificar se realmente há influência do aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz no desgaste abrasivo, a Tabela 24 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F menor que o valor de F crítico, que para o ensaio de desgaste abrasivo não há influência o aumento da porcentagem de CCA residual. Assim é possível constatar que para este ensaio o aumento da porcentagem de substituição do cimento por cinza de casca de arroz residual não influencia nos resultados.

Tabela 24 – ANOVA da influência do aumento da incorporação da cinza no ECC quanto à resistência ao desgaste abrasivo

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Efeito do aumento da CCA	Entre grupos	0,358245	2	0,179123	2,38669	0,125915	3,68232
	Dentro dos grupos	1,125759	15	0,075051			
	Total	1,484004	17				

4.2 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA 1

Com o intuito de classificar os ECCs da etapa 1 deste trabalho qualitativamente (Tabela 25), foi desenvolvida a fim de comparação entre o comportamento mecânico e a resistência a processos deteriorativos com a finalidade de determinar parâmetros para que este tipo de compósito pode ser aplicado na construção civil.

A classificação ocorreu conforme limites estabelecidos por cada norma para cada ensaio, resultados estes que já foram discutidos no item 4.1 deste trabalho. Ao analisar o comportamento mecânico dos ECCs é possível notar que houve um decréscimo do comportamento mecânico quando houve o aumento da substituição de cimento Portland CP V-ARI-RS pela cinza de casca de arroz residual sem controle de queima.

Os ensaios de caracterização do comportamento mecânico que envolvem os ensaios de flexão à quatro pontos, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Para estes ensaios foi possível observar que a classificação qualitativa possui uma tendência de que o aumento da porcentagem de CCA residual obtenha uma diminuição do desempenho do ECC.

Para a resistência aos processos deteriorativos já ocorreu uma classificação ao contrário do comportamento mecânico, conforme ocorreu o aumento da porcentagem de cinza de casca de arroz residual, melhores resultados foram obtidos quando se trata de ensaios de durabilidade.

O ensaio de reação álcali-sílica é o ensaio que delimitou o uso do ECC na construção civil, pois a sua aplicabilidade depende muito se este tipo de material irá expandir ou não numa estrutura por exemplo quando aplicado. Já se sabe que a aplicação do ECC para a infraestrutura como solução de recapeamento de pavimentos tem sido aplicado já em grande escala no meio acadêmico internacional. No Brasil ainda há muitas lacunas a serem preenchidas quando se trata da aplicação do ECC na realidade brasileira, como foi mencionado no subitem 2.2 deste trabalho.

Tabela 25 – Análise Qualitativa da Etapa 1

SÍNTESE DA FASE 1							
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA							
<i>ENSAIO DE FLEXÃO À 4 PONTOS</i>							
<i>Código</i>	<i>Descrição</i>	<i>Tensão de Abertura de Primeira Fissura (MPa)</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>Deformação Máxima (%)</i>	<i>Flecha Máxima (mm)</i>	<i>Média de cada ensaio (Tensão Máxima)</i>	<i>Classificação por Desempenho (1 a 3)*</i>
30ECC1	30% CCA	2,78 ± 0,2	2,76 ± 0,1	3,1 ± 0,4	5,2 ± 0,5	6,227	1
50ECC1	50% CCA	5,04 ± 0,7	8,61 ± 0,3	4,6 ± 0,7	4,8 ± 0,4		3
70ECC1	70% CCA	5,33 ± 0,3	7,31 ± 0,2	8,02 ± 0,5	7,3 ± 0,3		2
<i>RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</i>							
<i>Código</i>	<i>Descrição</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>Desvio-Padrão</i>	<i>CV (%)</i>		<i>Média de cada ensaio (Tensão Máxima)</i>	<i>Classificação por Desempenho (1 a 3)*</i>
30ECC1	30% CCA	52,934	0,617	0,012		46,901	3
50ECC1	50% CCA	48,930	1,280	0,026			2
70ECC1	70% CCA	38,838	0,886	0,023			1
<i>MÓDULO DE ELASTICIDADE</i>							
<i>Código</i>	<i>Descrição</i>	<i>Tensão Máxima (MPa)</i>	<i>Desvio-Padrão</i>	<i>CV (%)</i>		<i>Média de cada ensaio (Tensão Máxima)</i>	<i>Classificação por Desempenho (1 a 3)*</i>
30ECC1	30% CCA	22,716	0,261	1,150		20,413	3
50ECC1	50% CCA	21,357	0,821	3,844			2
70ECC1	70% CCA	17,166	0,298	1,736			1
ENSAIOS BÁSICOS PARA INDICATIVO DE DURABILIDADE							

<i>PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETOS</i>								
<i>Código</i>	<i>Descrição</i>	<i>Carga Q (Columbs)</i>	<i>SD</i>	<i>CV(%)</i>	<i>Risco (ASTM C1202)</i>	<i>Média de cada ensaio (Carga Q)</i>	<i>Classificação por Desempenho (1 a 3)*</i>	
30ECC1	30% CCA	2734,575	258,052	9,437	Moderado	1562,462	1	
50ECC1	50% CCA	1128,053	66,624	5,906	Baixo		2	
70ECC1	70% CCA	824,759	15,255	1,850	Muito Baixo		3	
<i>REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA</i>								
<i>Código</i>	<i>Descrição</i>	<i>Expansão Média 16 dias (%)</i>	<i>Classificação NBR 15577/5 (0,1%)</i>	<i>Expansão Média 30 dias (%)</i>	<i>Classificação NBR 15575/4 (0,19%)</i>	<i>Média de cada ensaio (Expansão 30 dias)</i>	<i>Classificação por Desempenho (1 a 3)*</i>	
30ECC1	30% CCA	1,0272	REATIVO	-	REATIVO	0,277	1	
50ECC1	50% CCA	0,2916	REATIVO	0,5324	REATIVO		2	
70ECC1	70% CCA	0,0088	INÓCUO	0,0223	INÓCUO		3	
<i>RESISTÊNCIA AO DESGASTE ABRASIVO</i>								
<i>Código</i>	<i>Descrição</i>	<i>PERDA DE MASA MÁXIMA (2mim)</i>	<i>Desvio-Padrão (2mim)</i>	<i>CV (%) (2mim)</i>	<i>PERDA DE MASA MÁXIMA (10mim)</i>	<i>Desvio-Padrão (10mim)</i>	<i>CV (%) (10mim)</i>	<i>Classificação por Desempenho (1 a 3)*</i>
30ECC1	30% CCA	4,35	0,60	0,40	3,50	0,15	0,111	1
50ECC1	50% CCA	2,77	0,27	0,30	4,03	0,07	0,051	2
70ECC1	70% CCA	2,20	0,33	0,42	3,58	0,26	0,184	3

* Classificação:

- 1 - Baixo Desempenho
- 2 - Médio Desempenho
- 3 - Alto Desempenho

Como já foi discutido no item 4.1.5 desta tese, existe a possibilidade da reação álcali-silíca ser inerte devido ao baixo consumo de cimento nas misturas com teores altos de CCA residual, diminuindo a quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reagir com o óxido de silício (SiO_2) que contém na cinza de casca de arroz residual. Lembrando que isto se torna uma das principais desvantagens do uso das adições pozolânicas em elevados teores, ocasionando uma diminuição do pH da solução dos poros o que pode ocasionar numa carbonatação acelerada (ZHANG *et al.*, 2000).

Em relação a resistência à abrasão por desgaste mecânico demonstrou que não há influencia no aumento da porcentagem de substituição do cimento pela cinza de casca de arroz residual. A resistência da fibra e a distribuição aleatória em todos os sentidos na matriz cimentícia já se torna suficiente para a sua resistência, demonstrando que o ECC é uma alternativa viável quando utilizado para uma possível utilização como pavimento/laje.

4.3 ETAPA 2: REOLOGIA DOS ECC-CCA

Conforme o item 4.4 deste estudo, foi proposto analisar os parâmetros reológicos das três porcentagens de substituição do cimento CP-V Ari-RS por cinza de casca de arroz residual nas três proporções escolhidas de variação do aditivo de 0,6%, 0,7% e 0,8%. Nesta etapa esta sendo discutido os parâmetros reológicos de viscosidade plástica, torque da mistura, fluidez pelo método de cone de Marsh e trabalhabilidade pelo método do mini-slump flow com e sem adição de fibras.

4.3.1 Viscosidade Plástica e Torque

A reologia é a ciência do fluxo e deformação dos materiais que estuda a relação entre a tensão, deformação e o tempo. A análise da viscosidade plástica é de suma importância para se obter a eficiência da dispersão das fibras de polipropileno na matriz cimentícia do ECC. Segundo Sahmaran *et al.* (2013) a viscosidade plástica deve ser alta o suficiente para manter a estabilidade da matriz para melhorar a dispersão das fibras.

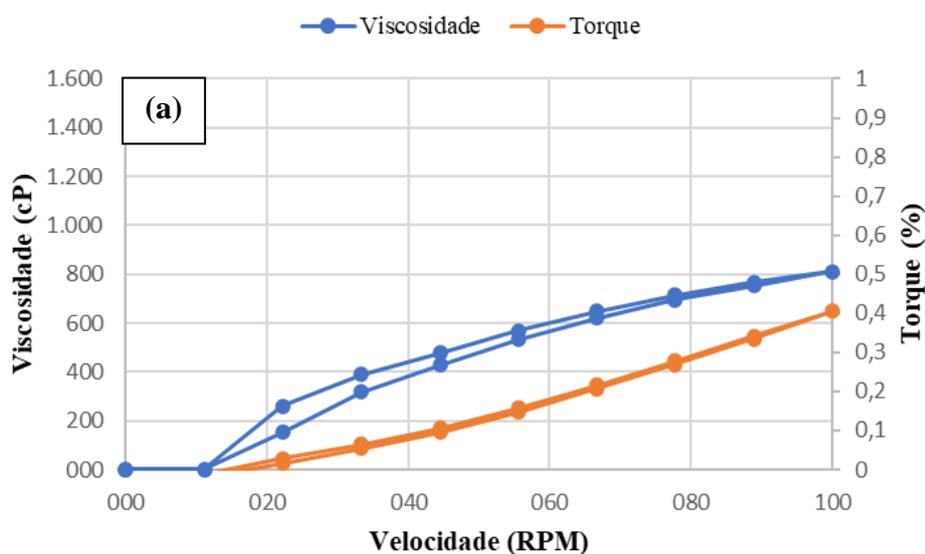
A Figura 59 demonstra os resultados encontrados para os três traços com CCA nas porcentagens de 0,6% (Figura 59a), 0,7% (Figura 59b) e (Figura 59c) 0,8%. Para o traço 30ECC-0,6, a curva de viscosidade plástica chega em uma viscosidade plástica na velocidade máxima de 100 Rpm de 800 cP, e a medida que a velocidade reduz de 100 Rpm para 0 Rpm

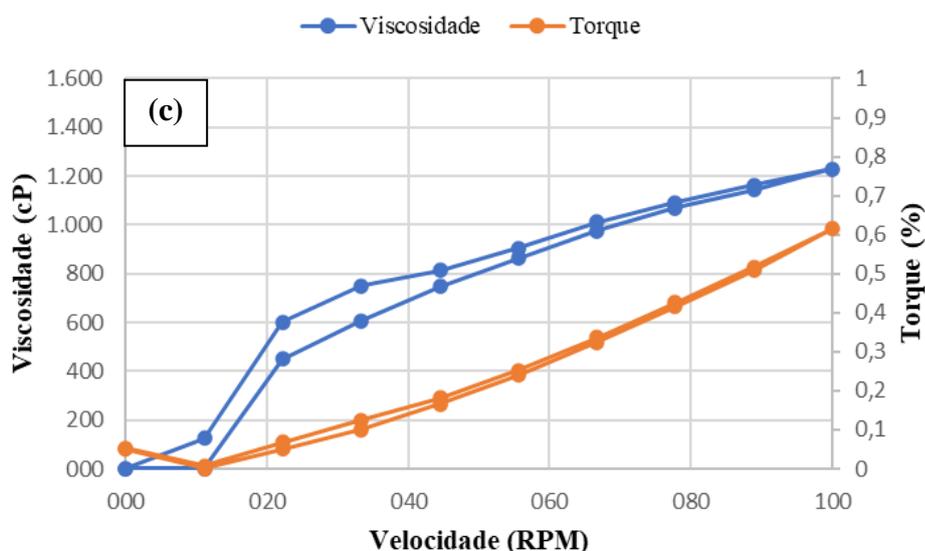
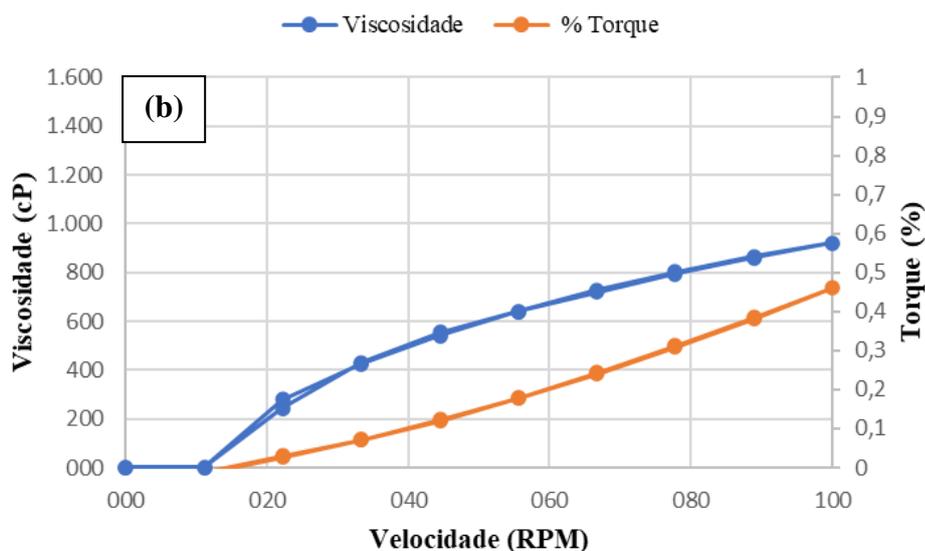
percebe-se que não há uma diferença de viscosidade até a velocidade de 70 Rpm, após esta velocidade há uma pequena redução da viscosidade desta mistura. Já para a avaliação do torque em porcentagem percebe-se que não há perda de torque conforme a velocidade reduz de 100 Rpm para 0 Rpm, obtendo uma porcentagem máxima de 0,4%.

O traço que foi aumentada a porcentagem de 0,6% para 0,7% de aditivo, (30ECC-0,7) percebe-se que a viscosidade aumentou de 800 cP para 920 cP na velocidade máxima de 100 Rpm, também percebe-se que não ocorre uma perda de viscosidade com a redução da velocidade. O torque também apresenta um leve aumento na velocidade máxima em relação ao traço 30ECC-0,6, um aumento de 13,04%.

Na porcentagem de 0,8% de aditivo percebe-se um aumento da viscosidade na velocidade de 100 Rpm, obtendo um valor máximo de 1230 cP, obtendo um aumento de 53,75% em relação ao traço 30ECC-0,6 e de 33,60% em relação ao traço 30ECC-0,7. Percebe-se também uma redução da viscosidade conforme a velocidade reduz para 0 Rpm, e fica mais evidente essa redução da velocidade de 30 Rpm da volta para zero. Automaticamente conforme ocorreu aumento da viscosidade também houve um aumento do torque da mistura, obtendo um valor máximo de 0,6% na velocidade máxima de 100 Rpm.

Figura 59 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 30% de CCA residual (a) 30ECC1-0,6, (b) 30ECC-0,7 e (c) 30ECC-0,8





Para o traço com 50% de CCA residual com as três porcentagens de aditivo é possível perceber que em relação aos traços de 30% de CCA residual, ocorre um aumento da viscosidade e do torque das misturas conforme, Figura 60. Os traços 50ECC-0,6 (Figura 60a) e 50ECC-0,7 (Figura 60b) apresentaram comportamento muito semelhante entre si tanto para a viscosidade plástica quanto para o torque das misturas. Os dois traços obtiveram um valor máximo de viscosidade e de torque da ordem de 1000 cP e 0,5%, respectivamente.

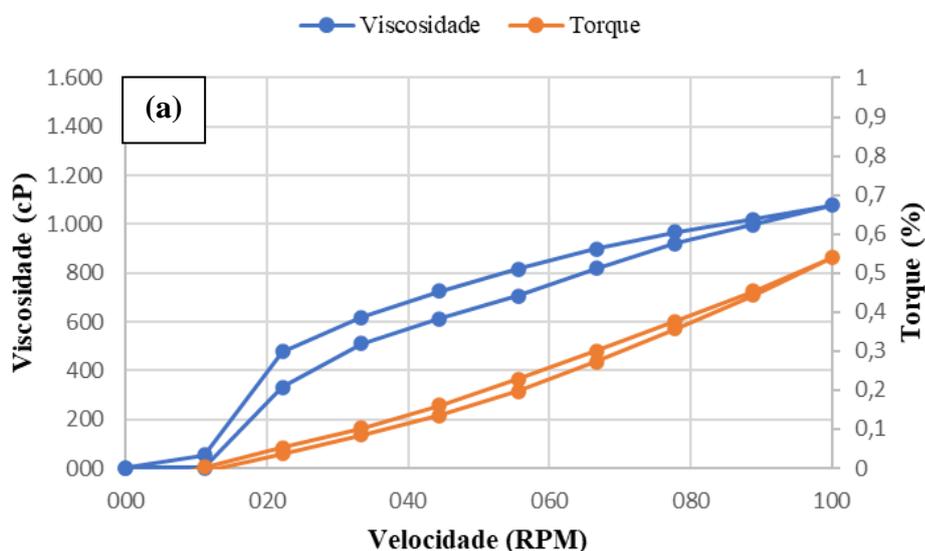
Para o traço 50ECC-0,8 (Figura 60c), percebe-se um aumento da viscosidade na velocidade máxima de 100Rpm, obtendo um valor de 1230 cP e um torque de 0,6%. Conforme Aïtcin e Jolicoeur (1994) a melhora na fluidez pode ser explicada por ter ocorrido

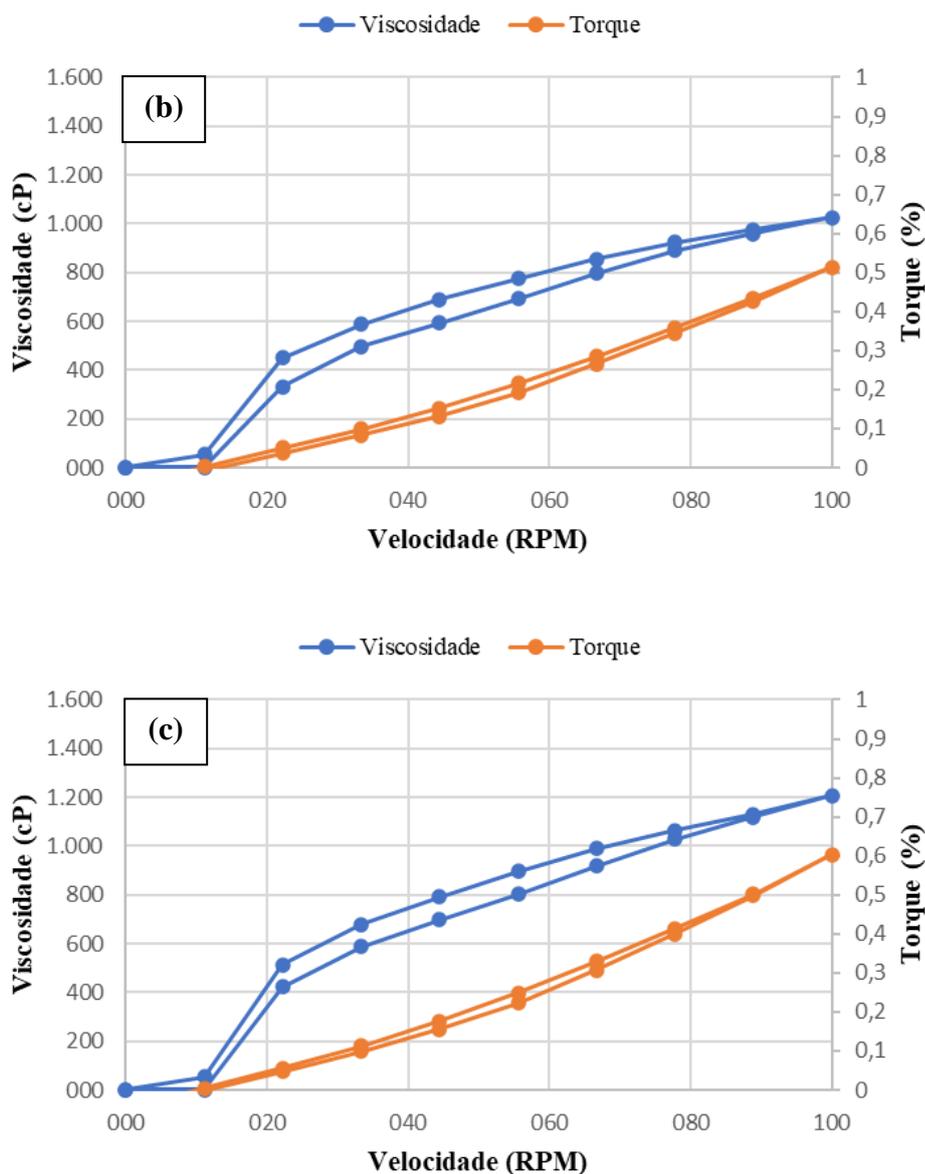
uma melhor dispersão das partículas sólidas por meio de forças de repulsão do aditivo superplastificante.

As forças atuantes entre as partículas de cimento compreendem as forças de van der Waals (forças de atração) e as forças de repulsão eletrostática geradas pela carga elétrica presente na superfície das partículas. Porém, com a adição de um aditivo, as forças de repulsão eletrostática são aumentadas e, com isso, forças de repulsão estérica são geradas, realçando o aumento de densidade local causado pela sobreposição de camadas de aditivo adsorvido (UCHIKAWA *et al.*, 1997; FLATT e BOWEN, 2003).

Outro fator que pode explicar o aumento da viscosidade conforme aumenta o teor de aditivo pode estar correlacionada com as forças viscosas que são proporcionais à diferença de velocidade de deslocamento entre as partículas de cimento e a água circundante, e entre um agregado e a pasta de cimento que o envolve. Como os materiais à base de cimento estão dentro da faixa de suspensões densas, as partículas têm que se afastar, especialmente quando aglomerados são formados, função dos aditivos superplastificantes (NEHDI *et al.*, 1998).

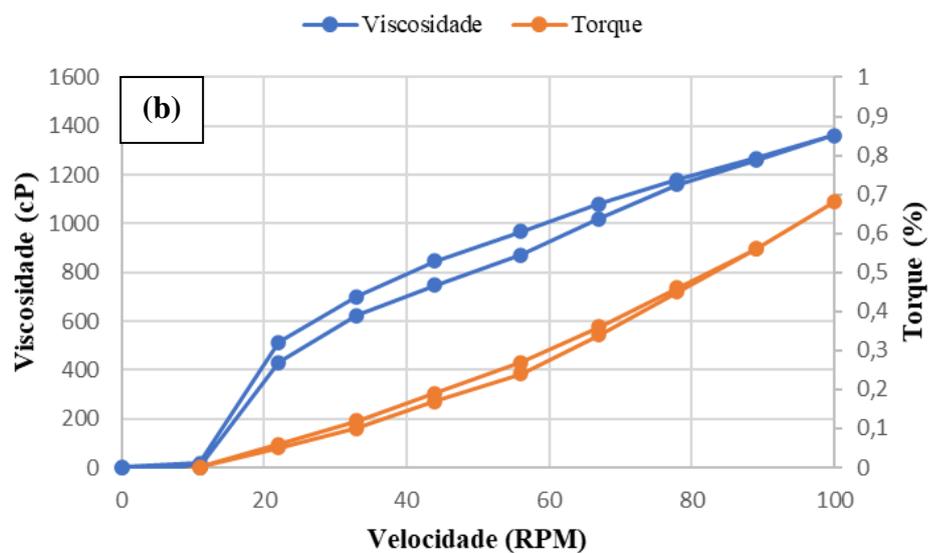
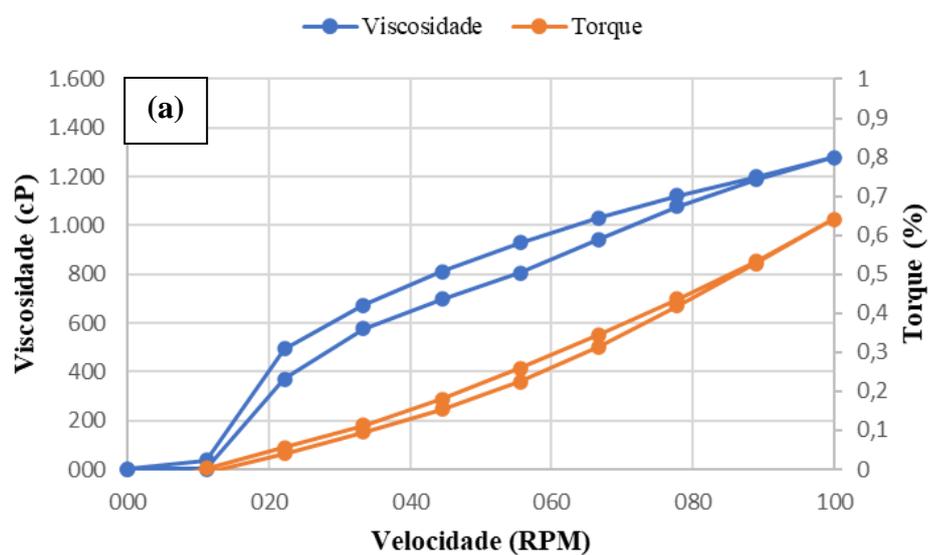
Figura 60 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 50% de CCA residual (a) 50ECC1-0,6, (b) 50ECC-0,7 e (c) 50ECC-0,8

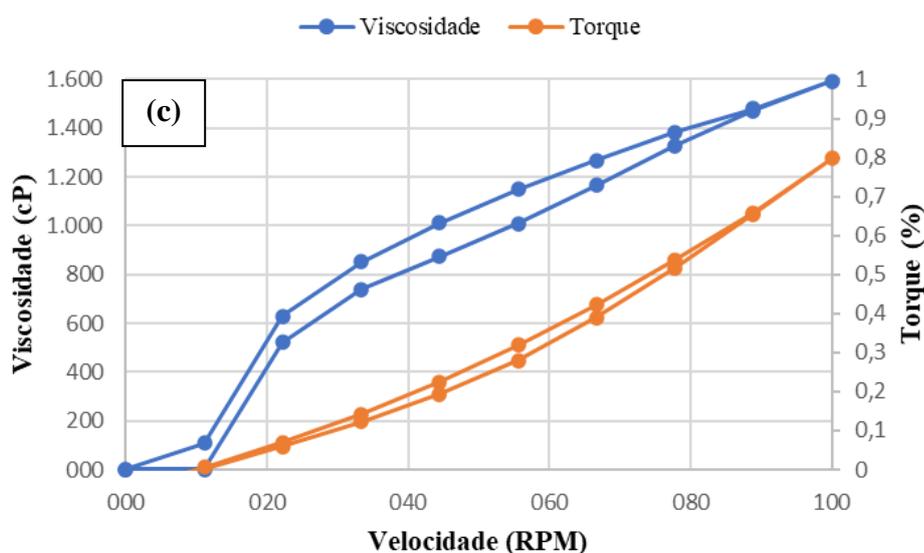




A Figura 61 ilustra a porcentagem de 70% de CCA residual para as três porcentagens de aditivos escolhidas para esta etapa. É possível observar que a medida que se aumentou o teor de substituição do cimento Portland CP V-ARI RS por CCA residual houve um aumento do torque e da viscosidade plástica. O traço 70ECC1-0,6 (Figura 61a) obteve uma viscosidade máxima de 1280 cP e um torque máximo de 0,65%. Também é possível perceber que ocorre uma perda da viscosidade conforme a velocidade sofre uma redução de 100 Rpm até 0 Rpm, já as curvas de torque se mantiveram semelhantes tanto na aceleração quanto na redução da velocidade.

Figura 61 – Curvas de viscosidade de torque para as misturas 70% de CCA residual (a) 70ECC1-0,6, (b) 70ECC-0,7 e (c) 70ECC-0,8





O traço 70ECC-0,7 (Figura 61b) obteve um leve incremento no valor máximo da viscosidade plástica em relação ao traço 70ECC-0,6 respectivamente de 11,34%, também é possível perceber um comportamento muito análogo ao traço 70ECC-0,6 com as curvas de aceleração e redução da velocidade.

Em relação ao traço 70ECC-0,8 (Figura 61c) nota-se um aumento da viscosidade em relação as demais porcentagens de aditivo, mas também em relação aos demais traços com diferentes substituições de cimento por CCA residual. A viscosidade máxima na velocidade de 100 Rpm foi de 1594 cP e um torque de 0,8%. Acredita-se que o aumento da viscosidade neste caso possa estar atrelado ao aumento da porcentagem de CCA residual, pois o aumento da viscosidade está muito correlacionado com a distribuição granulométrica e da forma das partículas presentes.

Segundo Nehdi *et al.* (1998) a viscosidade geralmente aumenta à medida que se afasta da curva granulométrica ideal e atinge um mínimo para um determinado volume de água e para um arranjo de partículas mais compacto. Além do mais, qualquer divergência da forma esférica implica no aumento da viscosidade para um volume de pasta constante. Assim, na presença superplastificante, quanto mais fina e mais esférica for a adição mineral incorporada, melhores serão as propriedades reológicas da mistura.

Outro fator que pode explicar esse aumento da viscosidade é devido as características pozolânicas se tornarem mais acentuadas conforme se aumenta a concentração. A propriedade pozolânica, da cinza é devido a presença de compostos siliciosos ou sílico-aluminosos, que apresentam pouco ou nenhum valor aglomerante, porém quando na presença de água ficam

disponíveis a reagirem quimicamente com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, produzindo através da reação química compostos com propriedades aglomerantes, aumentando assim a tensão de cisalhamento (JOSHI e LOHTIA, 1997).

4.3.2 Fluidez pelo Método de Cone de Fluxo Marsh

A Figura 62 demonstra os resultados de fluidez da matriz cimentícia do ECC, ou seja, sem fibras. Este ensaio consiste em medir o tempo necessário para preencher um volume conhecido. O tempo de escoamento hipotetiza que a reologia da matriz cimentícia do ECC no estado fresco rege diretamente a dispersão da fibra, que influencia diretamente no desenvolvimento da múltipla fissuração (Li e Li, 2013).

O tempo de fluxo pelo cone de Marsh é considerado como um método indireto de avaliação da reologia da matriz cimentícia do ECC. As vantagens do método indireto são a sua simplicidade e portabilidade do dispositivo para locais de mistura. O teste de vazão do cone Marsh pode ser adotado como um método prático e confiável para controle de qualidade durante o processamento de ECC no local.

Este ensaio correlaciona-se bem com a viscosidade plástica da matriz cimentícia do ECC, conforme já discutido no item anterior desta tese, percebe-se uma leve tendência do aumento do escoamento conforme se aumenta teor de aditivo superplastificante.

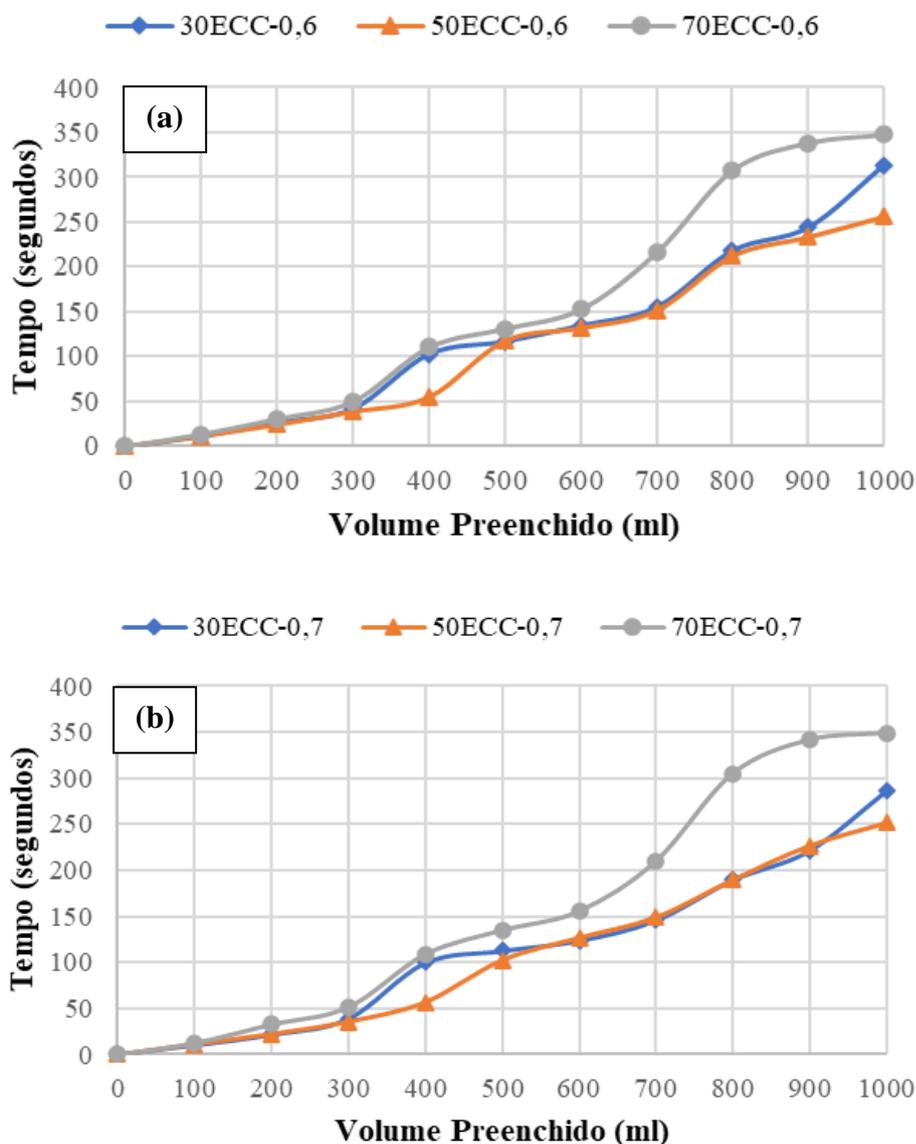
Ao avaliar a porcentagem de 0,6% de aditivo na mistura do ECC com 30%, 50% e 70% de CCA é possível observar que até o volume de 300 ml é possível perceber que todas as misturas apresentaram um tempo de escoamento praticamente igual. No volume preenchido de 400 ml é possível visualizar que o traço com 50ECC-0,6 obteve um tempo menor de escoamento quando comparado aos outros dois traços. E para os demais volumes preenchidos nota-se uma grande similaridade entre o traço 30ECC-0,6 e o traço 50ECC-0,6. O traço 70ECC-0,6 foi o que mais demandou tempo de escoamento. Acredita-se que este comportamento esteja atrelado ao alto valor de cinza de casca de arroz sem controle de queima na mistura.

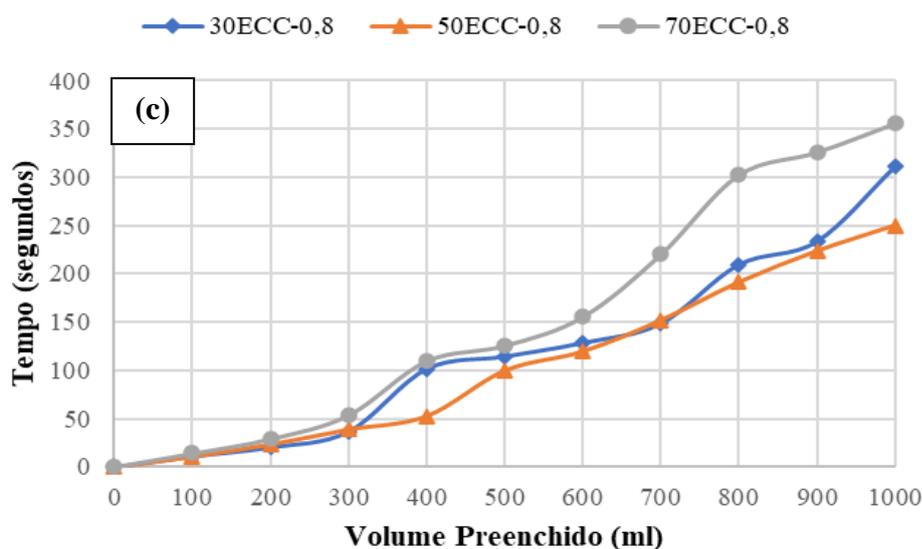
Para as porcentagens de 0,7% e de 0,8% de aditivo na mistura, não demonstraram uma maior fluidez nos traços estudados. Nota-se novamente a mesma tendência do tempo de escoamento com a porcentagem de 0,6%. Observa-se que os tempos de escoamento foram altos, isso indica que as pastas não era muito fluídas, ou seja, apresentavam baixa viscosidade,

conforme corrobora com os resultados encontrados com ensaio de viscosidade plástica através do uso do viscosímetro rotacional.

Nota-se também que independente do teor de aditivo incorporado nas misturas o traço 70ECC apresentou maior tempo de escoamento, demonstrando ser a mistura com menor fluidez quando comparada com as demais porcentagens de CCA. A partir do preenchimento do volume de 600 ml ocorre uma pequena inclinação da curva do traço 70ECC em todas as porcentagens de aditivo, demonstrando um maior afastamento entre as demais curvas, indicando uma maior perda de fluidez com o tempo.

Figura 62 – Resultados de fluidez da matriz cimentícia dos ECCs conforme método de cone de Marsh (a) 30ECC, (b)50ECC e (c)70ECC





Fonte: Autoria Própria.

Para verificar se realmente há influência do aumento do aditivo nas misturas com as três porcentagens de CCA residual, a Tabela 26 confirma estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F consideravelmente menor que o valor de F crítico. Assim é possível constatar que para o ensaio de fluidez pelo método do cone de fluxo de Marsh o aumento da porcentagem do uso de aditivo superplastificante não influencia nos resultados.

Tabela 26 – ANOVA da influência do aumento da adição de aditivo superplastificante nas misturas de ECC

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
	Entre grupos	39092,2556	8	4886,531	0,420095	0,906196	2,042985
Efeito do aumento do Aditivo	Dentro dos grupos	1046877,02	90	11631,96			
	Total	1085969,27	98				

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

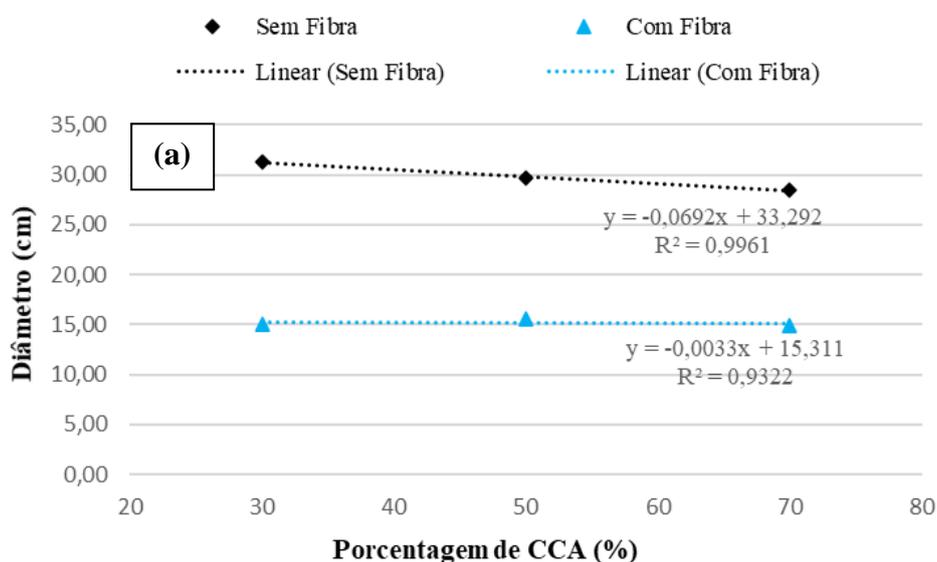
Fonte: Autoria Própria.

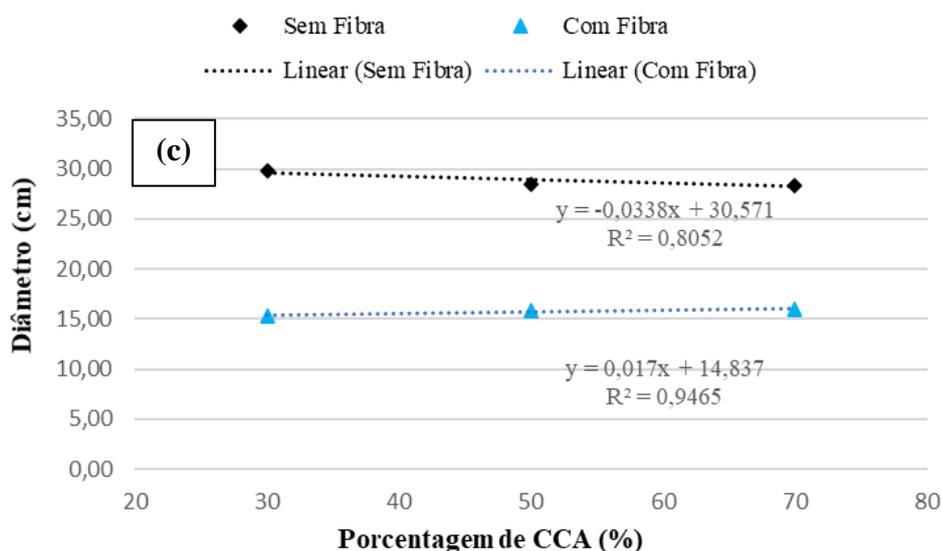
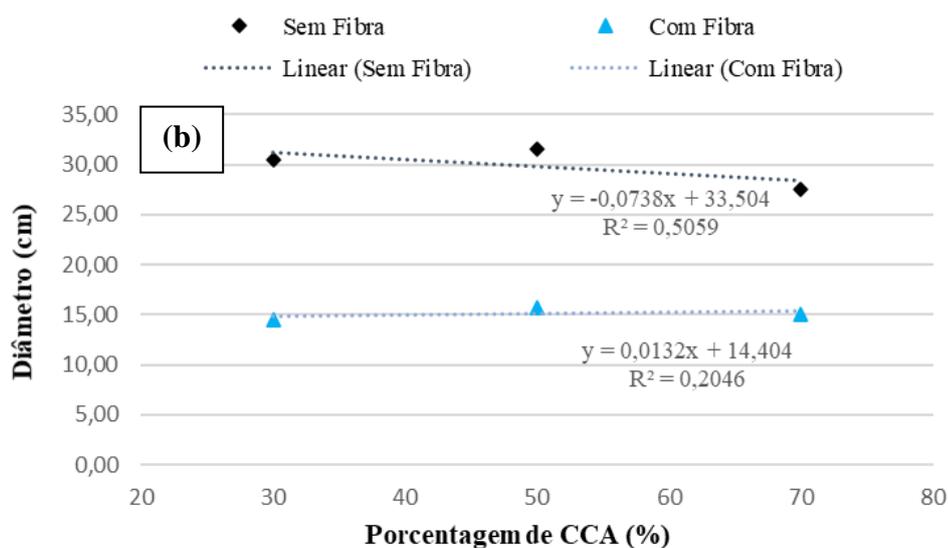
4.3.3 Trabalhabilidade pelo Método Mini-Slump Flow

A Figura 63 mostra a medição dos diâmetros de fluxo de mini-slump flow dos três traços de ECC com CCA residual nas três porcentagens do uso do aditivo superplastificante antes e depois da adição de fibras (para 0,6% na Figura 63a, para 0,7% na Figura 63b e para 0,8% na Figura 63c). Para todas as misturas, ao adicionar 2% de fibras é possível perceber uma redução do diâmetro das misturas. Ao analisar a matriz cimentícia (sem fibra) dos ECC, conforme houve o aumento da substituição de cimento por cinza de casca de arroz ocorreu uma leve diminuição do diâmetro de abatimento.

Ao acrescentar a fibra na matriz cimentícia é possível observar que entre as porcentagens de substituição, ou seja, 30%, 50% e 70% não houve uma diferença no diâmetro, onde todas as misturas ficaram com um diâmetro próximo de 15 cm. Li e Li (2013) também obtiveram um comportamento semelhante a este trabalho, onde a incorporação da fibra influencia diretamente na trabalhabilidade das misturas.

Figura 63 – Diâmetro do fluxo mini-slump (antes e depois da adição de fibras) das misturas (a) 0,6% de aditivo, (b) 0,7% de aditivo e (c) 0,8% de aditivo





Fonte: Autoria Própria.

Conforme mencionado no item 3.3.2.3 deste estudo, o ensaio de abatimento pelo método de mini-slump flow, é realizado o preenchimento do molde sem compactação e depois é levantado o cone assim deixando a amostra se espalhar livremente na base. Para a determinação do diâmetro da matriz cimentícia (sem fibra) foi possível realizar o ensaio conforme o método proposto, porém quando adicionado a fibra, não houve nenhum espalhamento após a retirada do molde.

A Figura 64 ilustra as etapas do ensaio, onde é visto a falta de trabalhabilidade nas misturas do ECC, assim seguiu os preceitos da NBR 13276 (2016) ao adicionar a fibra, ou seja, foi realizada o preenchimento do cone em três camadas iguais, e aplicado 15, 10 e 5

golpes com um soquete, respectivamente. Após esta etapa foi realizado 30 golpes de queda na mesa, cada golpe por 1 segundo, com esta etapa de queda que foi possível medir o diâmetro das amostras de ECC (com fibra).

Ao analisar a Figura 64 nota-se que somente após 30 golpes houve um pequeno espalhamento do compósito na mesa, mas em contrapartida mesmo colocando uma energia para o espalhamento, as misturas de ECC, independente do traço, todas as misturas possuem um aspecto de massa de modelar, a tal ponto que é possível realizar uma bola com a mão. Por esse motivo se mostra a necessidade de realizar um estudo para se obter diferentes trabalhabilidades pois a trabalhabilidade atual do ECC com cinza de casca de arroz e fibras de polipropileno prejudica muito ainda a moldagem de corpos de prova de maior escala.

Figura 64 – Aspectos do ensaio de abatimento das misturas de 30ECC



Fonte: Autoria Própria.

Ao avaliar a influência do aumento do aditivo superplasticante nota-se que para as misturas sem fibras, independente da porcentagem de aditivo ocorre uma leve tendência a perder abatimento conforme se aumenta a porcentagem de CCA residual, comportamento também notado nas misturas com fibras, onde o diâmetro quase não varia conforme há o aumento tanto da CCA residual, quanto da porcentagem de aditivo.

Para verificar se realmente há influência do aumento da porcentagem de aditivo, as Tabelas 27 e 28 confirmam estatisticamente, através da análise de variância ANOVA, em que, obteve-se um valor de F consideravelmente menor que o valor de $F_{crítico}$, ou seja, não há influência do aumento da porcentagem de aditivo. Cabe lembrar que para que as médias sejam consideradas iguais, é necessário que o valor de F seja menor que o $F_{crítico}$.

Tabela 27 – ANOVA da influência do aumento da adição de aditivo superplastificante no ECC sem fibras

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Efeito do aumento do Aditivo	Entre grupos	1,77388888	2	0,886	0,392003	0,691822	5,143253
	Dentro dos grupos	13,5755555	6	2,262			
	Total	15,3494444	8				

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

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 28 – ANOVA da influência do aumento da adição de aditivo superplastificante no ECC com fibras

Fator	Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Efeito do aumento do Aditivo	Entre grupos	0,6844543	2	0,342227	1,701170	0,259863	5,143253
	Dentro dos grupos	1,20702963	6	0,201171			
	Total	1,89148395	8				

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

Fonte: Autoria Própria.

Mesmo a análise estatística tendo demonstrado que não houve uma variação significativa nas misturas conforme houve o aumento da porcentagem de aditivo, durante o ensaio foi possível perceber que as misturas de 30ECC de 0,7% e 0,8% de aditivo obtiveram uma exsudação ao realizar os 30 golpes na mesa de abatimento, conforme Figura 65. Segundo Geyer e Sá (2005), em uma correlação direta, para proporcionar ao concreto alta fluidez, utiliza-se aditivos superplastificantes. Já para o controle da coesão, os aditivos modificadores de viscosidade combatem a exsudação e a segregação. Entretanto, estes não foram aplicados nos traços de ECC.

A melhor forma de evitar a exsudação é combinar aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade com elementos finos, entre eles, o próprio cimento Portland, as adições minerais (no caso da CCA residual) e/ou areia fina (TUTIKIAN, 2004).

Figura 65 – Abatimento das misturas de 30% CCA residual (a) 30ECC-0,7% e (b) 30ECC-0,8%



Fonte: Autoria Própria.

4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA 2

O intuito inicial da etapa 2 era analisar o traço com melhor desempenho mecânico e de indicativos de durabilidade da etapa 1 e realizar modificações na reologia deste traço. No entanto foi optado por fazer os ensaios da etapa 2 com as três porcentagens de CCA residual, ou seja, 30%, 50% e 70% de substituição do cimento. O que motivou a realização do estudo dos traços de 30ECC1 e 70ECC1 foi a possibilidade de verificar mais uma vez a influência da CCA residual nas misturas de ECC.

Em relação ao ensaio de viscosidade plástica e análise do torque foi possível perceber que conforme se aumentou o teor de substituição houve um leve incremento dos valores de viscosidade plástica e de torque. E também nota-se que conforme ocorreu o aumento da porcentagem de aditivo, houve também um leve aumento dos valores para as duas variáveis analisadas.

Já para os ensaios de fluidez pelo método de conce de fluxo Marsh e trabalhabilidade pelo método mini-slump flow com e sem fibras, percebe-se que o aumento do teor de substituição e o aumento da porcentagem do aditivo não influenciaram significativamente nos resultados, conforme análise estatística da ANOVA.

Com o intuito de tentar compreender melhor os resultados encontrados e ser possível explicar o motivo de não conseguir uma mistura de ECC mais fluída, com características mais próximas de um concreto autoadensável, o que era um dos objetivos iniciais desta tese, foi realizada uma análise de empacotamento das partículas conforme Figura 66, para 30ECC-0,6 (Figura 66a), 50ECC-0,6 (Figura 66b) e 70ECC-0,6 (Figura 66c). Cabe ressaltar que para essa modelagem de empacotamento de partículas foram realizadas somente para os traços com adição de aditivo no teor de 0,6%, que sempre foi o traço original do grupo de pesquisas LEME/UFRGS.

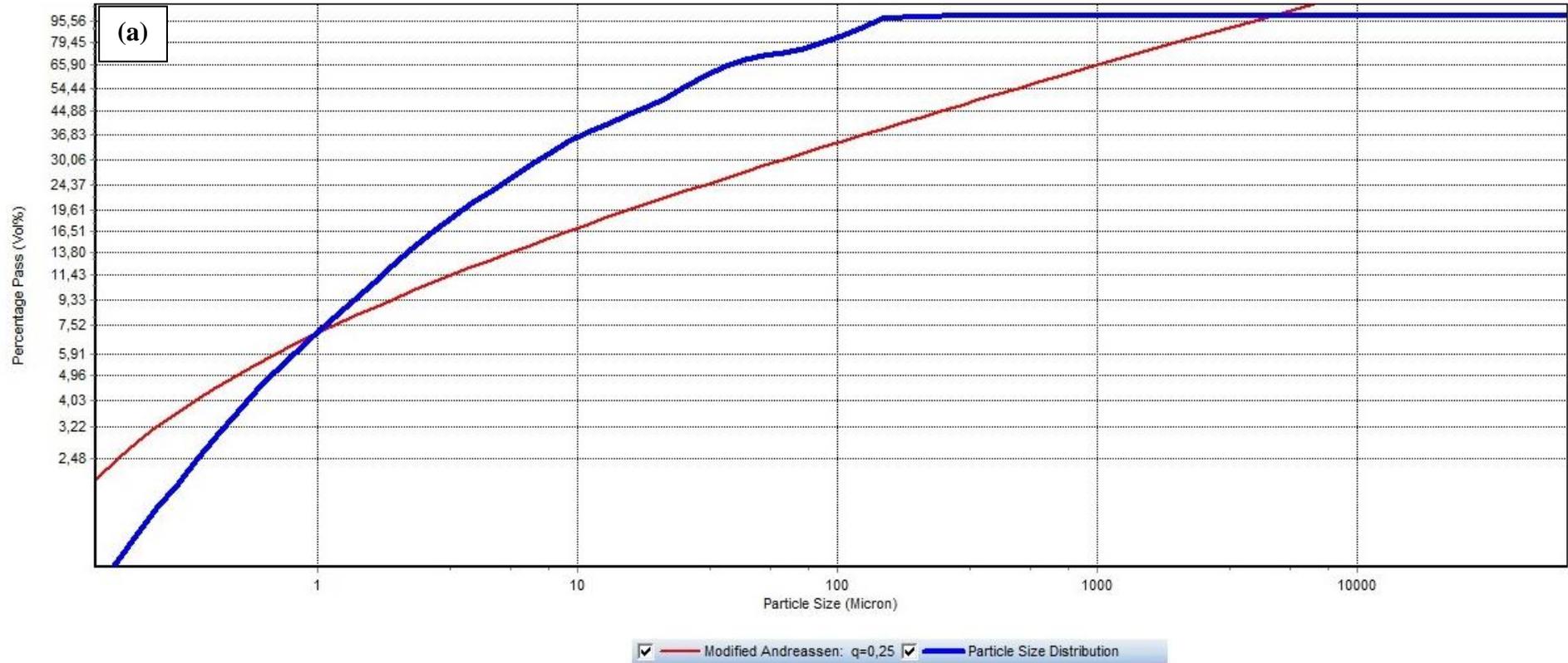
Para Reginato *et al.* (2010), o empacotamento de partículas divide-se em dois grupos: empacotamento real e teórico. O empacotamento real é descrito como uma fração com granulometria menor que a outra e que ocupe os vazios deixados pela fração granulométrica maior, portanto o empacotamento se desenvolve da fração granulométrica maior para a menor, e assim analisado experimentalmente através da misturas dos agregados de granulometrias diferenciadas, por isto caracteriza-se como um empacotamento real.

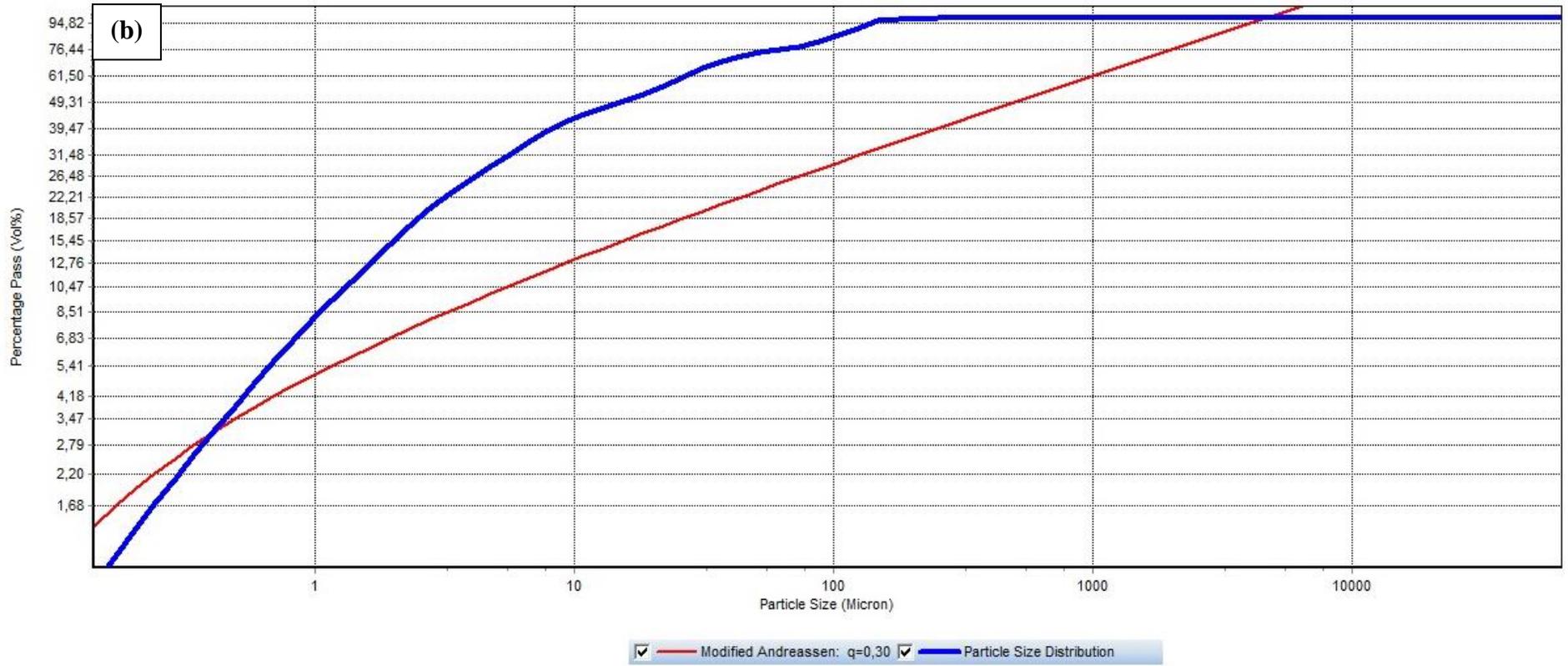
Segundo Vanderlei (2004) o estudo do empacotamento teórico é bastante amplo e existem alguns modelos ou métodos já desenvolvidos. Para este estudo utilizou-se o modelo de empacotamento teórico de Andreassen modificado, por considerar a existência de um tamanho mínimo e máximo de partícula, aproximando-se dos sistemas reais (HENCHE e MAZER, 2010).

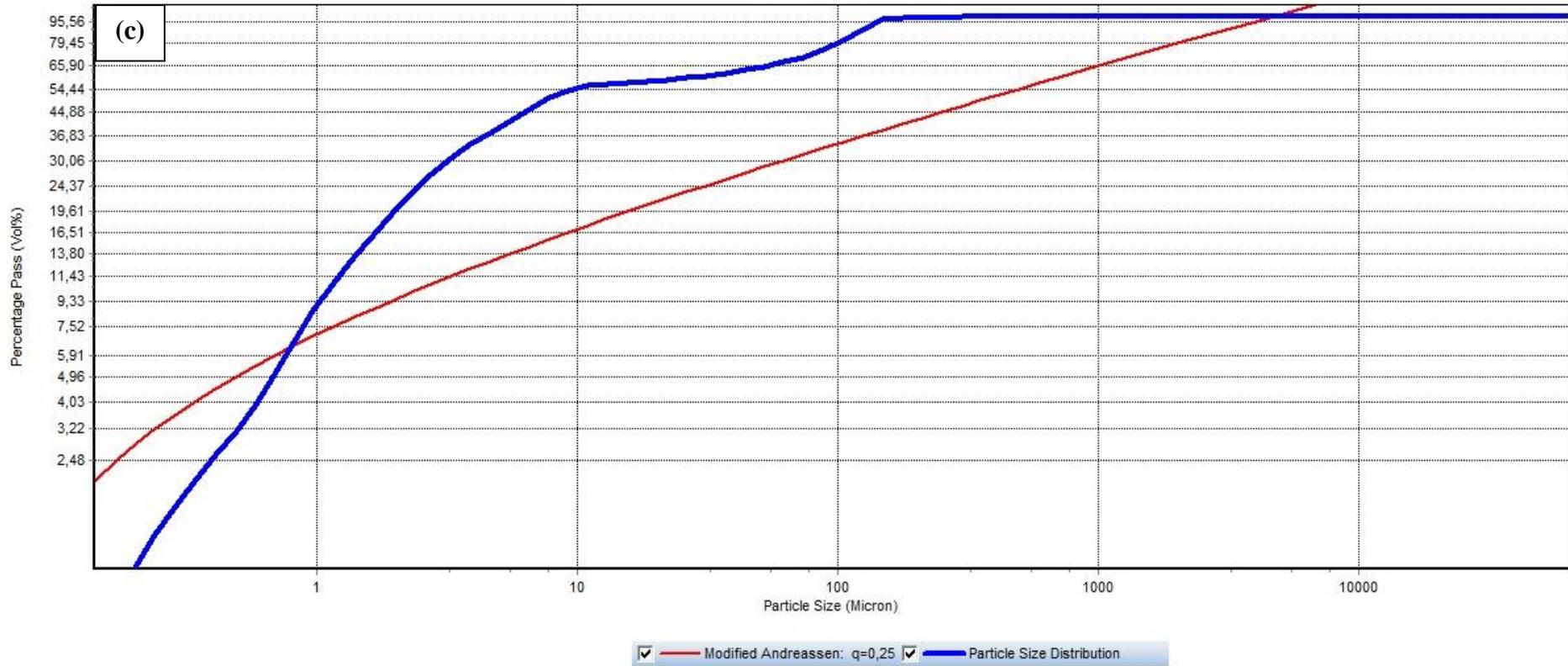
Também foi adotado o módulo ou coeficiente da distribuição no valor de 0,25, considerando uma mistura que necessita de vibração para melhorar seu adensamento, comportamento mais próximo de uma mistura de ECC com fibras. E foi preciso utilizar a caracterização dos materiais a serem empregados para a dosagem e os traços unitários.

Com os valores conhecidos das distribuições granulométricas dos materiais utilizados, o coeficiente de distribuição e as dimensões máximas e mínimas, realizou-se a dosagem com o auxílio do programa Elken Material Mix Analyzer (EMMA) desenvolvido pela empresa Elkem AS versão 352. Com os valores e as propriedades armazenadas no programa importaram-se os materiais da biblioteca assim foi possível realizar uma interpolação entre a quantidade dos materiais para a formação de uma curva de distribuição próxima a resultante do modelo de empacotamento.

Figura 66 – Empacotamento das partículas (a) 30ECC-0,6, (b) 50ECC-0,6 e (c) 70ECC-0,6







Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 66 que as três curvas de distribuição granulométrica estudadas, obtiveram curvas de distribuição granulométricas com vários pontos afastados da curva de distribuição ideal do modelo de Andreassen modificado. É possível observar que nos três traços analisados existe um excesso de partículas grossas e uma deficiência de partículas finas.

O traço 30ECC-0,6 foi o traço que conseguiu se aproximar da curva ideal entre os demais traços, onde os traços 50ECC-0,6 e 70ECC-0,6 obtiveram um maior excesso de partículas grossas. Mesmo ocorrendo o aumento da porcentagem de substituição do cimento por CCA residual percebe-se que quase não houve uma aproximação da curva ideal para nenhuma porcentagem, principalmente o traço 70ECC-0,6 que possui o maior teor de substituição. Sendo que o diâmetro médio da CCA residual é 3,59 μm , já a do cimento é de 9,65 μm , ou seja, o diâmetro médio da CCA residual é 37,20% menor que a do cimento.

Um fator que possa explicar o motivo de aumento de partículas de CCA residual não ter melhorado a curva de empacotamento é a morfologia das partículas. Quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, pois se verifica o atrito entre as partículas a partir do contato de suas superfícies irregulares. Quanto menor o tamanho das partículas irregulares, maior será esse efeito, devido à maior área superficial específica, como é o caso da partícula da CCA residual, conforme Oliveira *et. al.* (2000).

Por obter um excesso de partículas grossas foi possível compreender que a relação a/aglomerante utilizada nos traços está inadequada, o que favorece um grande número de vazios. E consequentemente o aumento do aditivo não surtiu nenhum efeito, podendo ser uma das explicações da exsudação das misturas, apresentadas no item 4.3.3.

Este excesso de partículas grossas e a falta de partículas finas promovem o surgimento de vazios, levando a um aumento na porosidade e redução da eficiência do empacotamento. Assim, a sequência de preenchimento dos vazios existentes entre as partículas, ou melhor, a distribuição granulométrica do sistema determina o aumento ou não do empacotamento ideal (OLIVEIRA *et. al.* 2000).

Compreende-se que o estudo do empacotamento de partículas seria melhor explorado se tivesse sido realizado no início da etapa 1 deste estudo. Mas como o objetivo desta tese era seguir o traço já estudados pelo grupo de pesquisas LEME/UFRGS, esta hipótese não foi levada em consideração no início dos testes. E também como o estudo da reologia estava programado para a etapa 2, também observou-se que se tivesse sido realizado este ajuste no

traço em função do empacotamento, seria possível otimizar melhor as propriedades mecânicas, reológicas e de indicativo de durabilidade.

4.5 ETAPA 3: ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

Conforme o item 3.4 desta tese, foi proposto realizar uma avaliação do ciclo de vida, com dois cenários de avaliação distintos. O primeiro cenário visa apenas analisar a produção de 1m³ dos traços de ECC referência, com 30%, 50% e 70% de CCA residual e comparando com um concreto para pavimentação. O segundo cenário visa a aplicação destes mesmos traços como uma camada de revestimento chamada overlay em pavimentos, avaliando a fase de construção, fase de uso e fim da vida da construção.

4.5.1 Cenário 1

A Figura 67 apresenta os gráficos da correlação dos impactos ambientais para cada uma das categorias analisadas em relação aos processos para produção de 1m³ (Materiais, Transporte, Outros) em relação a porcentagem de 100%. Neste gráfico é possível observar que cerca de 85% dos impactos ocasionados estão relacionados à aquisição dos materiais de construção, enquanto que cerca de 15% com o transporte dos materiais do berço ao portão.

Em relação aos valores dos impactos ambientais para as categorias de Depleção potencial de recursos abióticos é possível perceber que os materiais que mais impactaram nos traços de ECC foram o cimento Portland CP-V com uma média de 95% e a fibra de polipropileno com 5%. E para o traço CP (concreto pavimento) também foi o cimento Portland CP-V com 91% que mais impactou, seguido do diesel usado no transporte e na produção.

A produção do cimento contribui com a maior parte dos potenciais de aquecimento global, oxidação fotoquímica e de acidificação das misturas. Segundo Silva *et. al.*, (2020) a principal causa desses impactos são as emissões atmosféricas da produção de cimento, sobretudo CO₂, NO_x, SO₂ e CO, sendo que a emissão de CO₂ é de duas a três ordens de grandeza superior às demais, o que explica a importância do potencial de aquecimento global para produtos cimentícios.

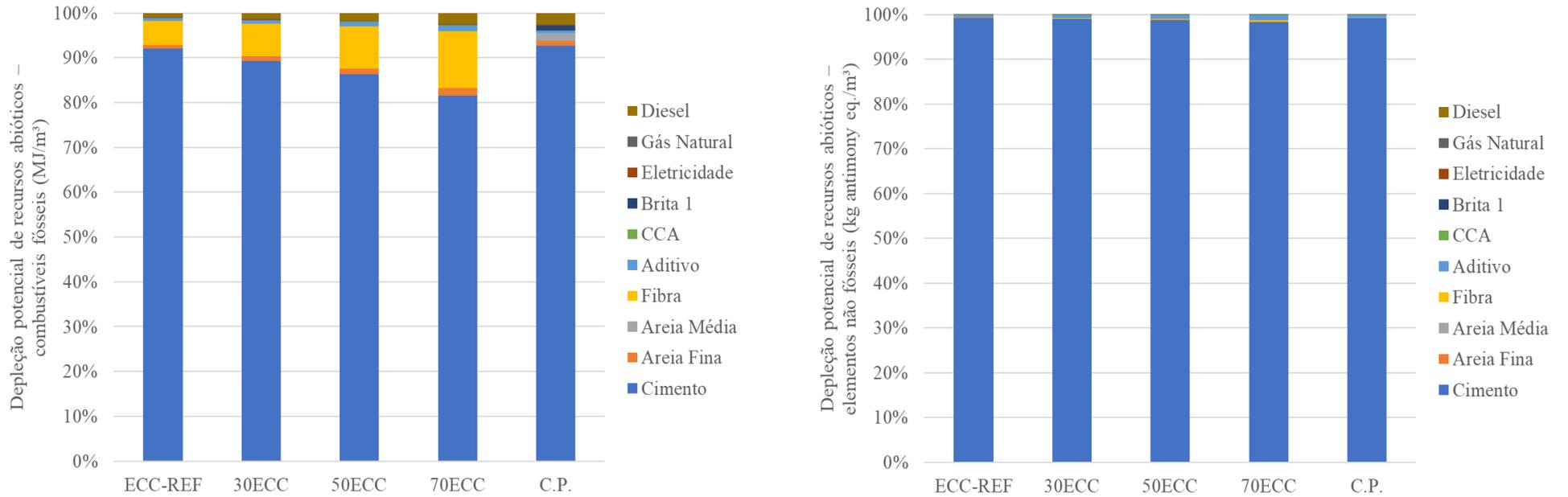
Para o uso do solo, água, eutrofização e Mudanças climáticas é possível observar que cerca de 93% dos impactos estão relacionados, independentemente do traço de ECC,

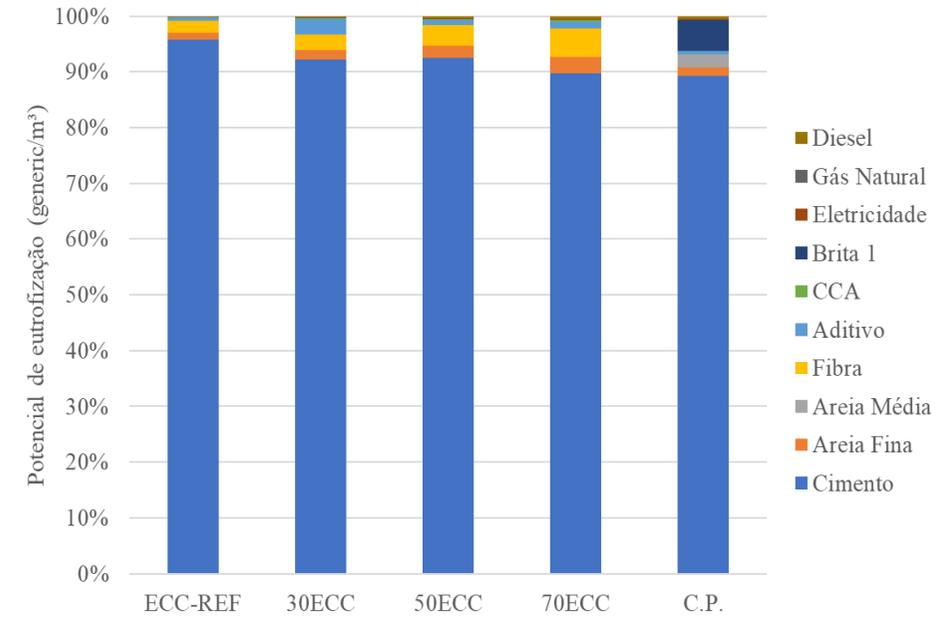
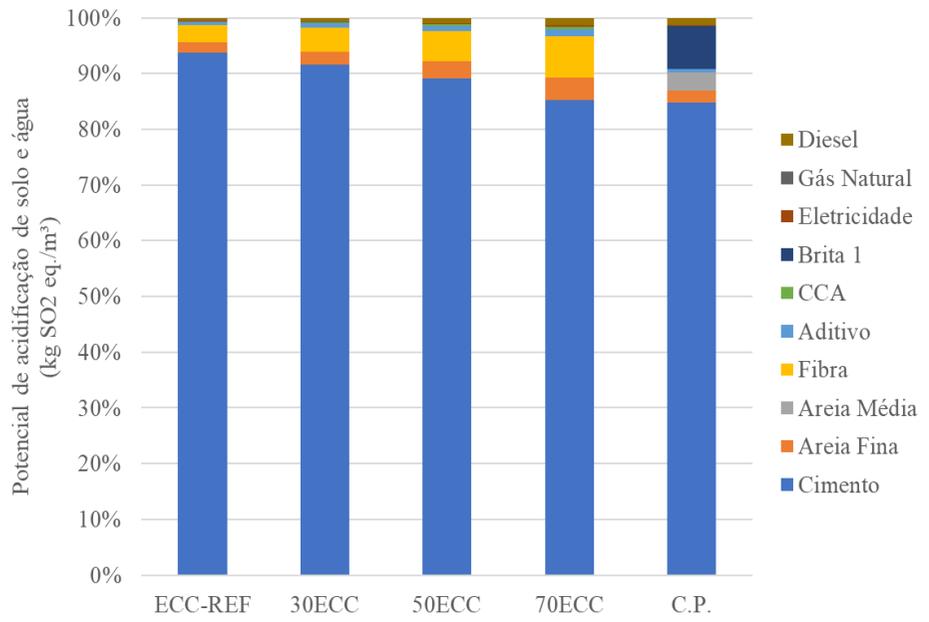
novamente impactam os materiais utilizados no traço como: Cimento Portland CP-V e fibra de polipropileno. Já para o concreto de pavimentação percebe-se que o agregado graúdo é um dos que mais impacta, além do cimento.

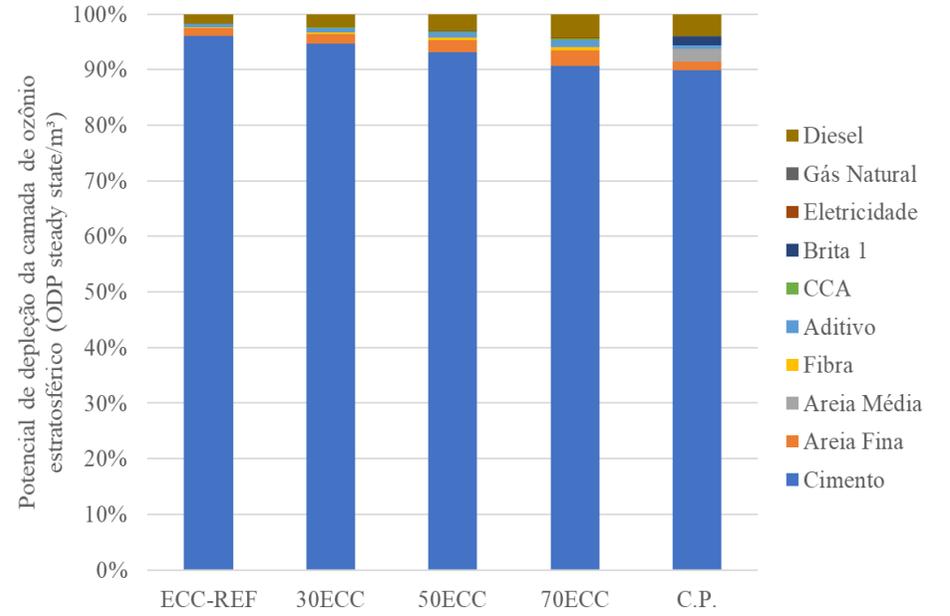
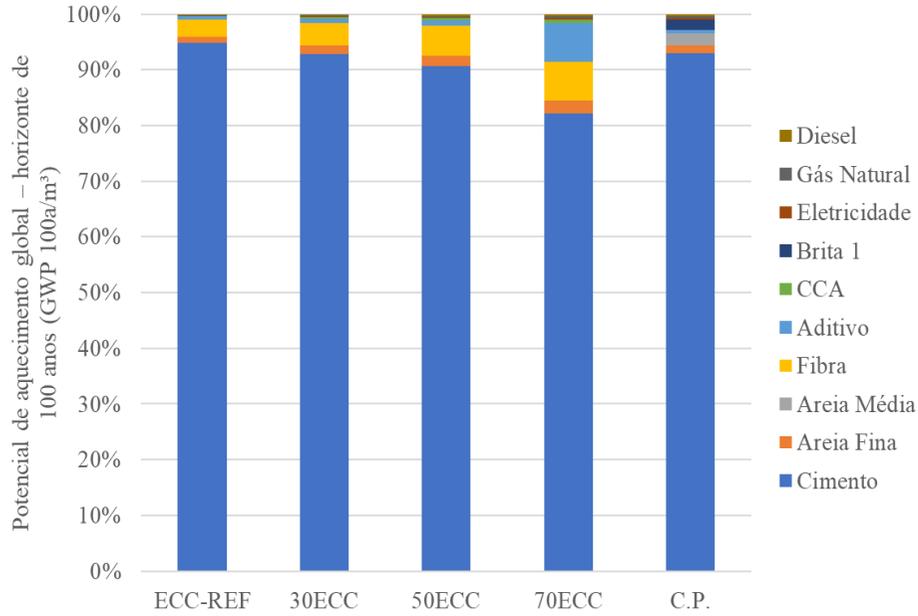
A produção de brita contribui para os potenciais de acidificação e de eutrofização do concreto, devido a emissões decorrentes do uso de explosivos no desmonte de rocha, enquanto a produção de areia apresenta contribuições relativas baixas. O potencial de esgotamento de recursos abióticos fósseis é influenciado pelo consumo de derivados de petróleo, que também contribui para o potencial de destruição da camada de ozônio, devido ao uso de compostos halogenados em substâncias extintoras usadas em plataformas de petróleo (SILVA *et.al.*, 2020).

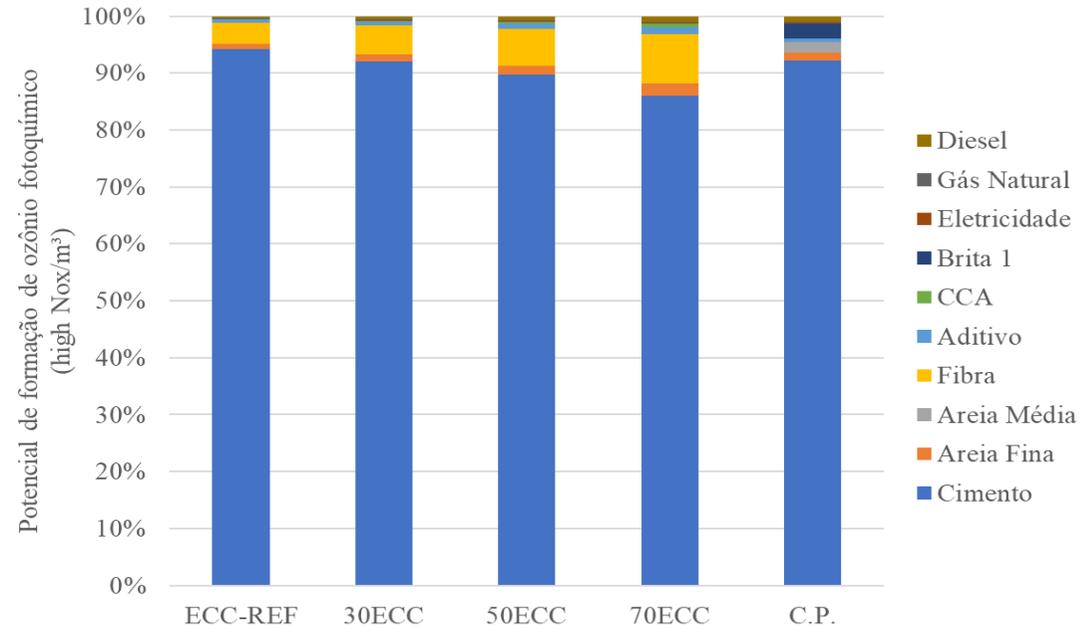
Os traços de ECC neste estudo contém de duas a três vezes mais o consumo de cimento do que em relação ao traço de pavimento (CP), sendo responsável pelo maior impacto em todas as categorias. Ao adicionar fibra de polipropileno percebe-se que esta adição contribui para o aumento dos impactos para este tipo de traço. Estes resultados corroboram com os resultados encontrados pelos pesquisadores Han Zhang *et al.* (2010) que também afirmaram que nas misturas de ECC os materiais que mais impactam na ACV é o cimento e fibra utilizada.

Figura 67 – Gráficos da correlação das categorias de impacto para diferentes traços analisados – cenário 1 (em relação a 100%)









Fonte: Autoria Própria.

A Figura 68 apresenta os mesmos impactos ambientais para cada uma das categorias analisadas do cenário 1 para a produção de 1m³ em quantificação de cada impacto ambiental, com a escala de cada categoria.

Para os impactos ambientais nas categorias de Depleção potencial de recursos abióticos é possível perceber novamente que os materiais que mais impactaram nos traços de ECC foram o cimento Portland CP-V e a fibra de polipropileno. Porém a medida que se aumenta o teor de substituição do cimento Portland por CCA residual, esses impactos automaticamente diminuem, com uma redução de 42% do traço ECC-REF para o traço 70ECC.

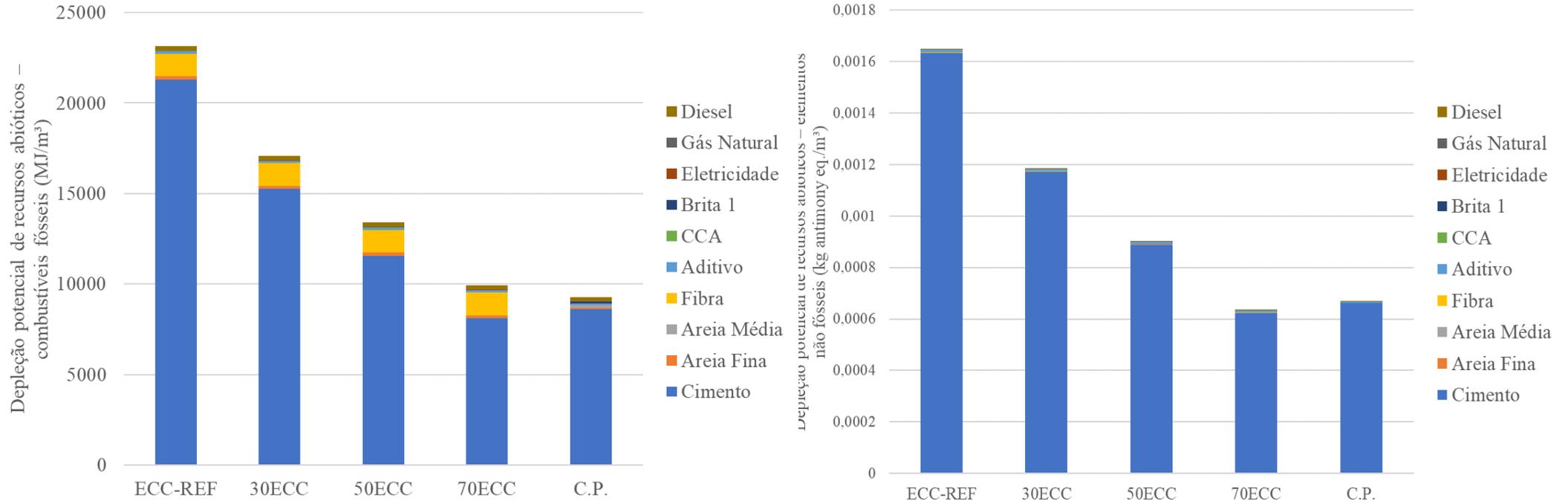
A fibra de polipropileno causa os mesmos impactos ambientais nos 4 traços de ECC devido a sua porcentagem ser a mesma para os traços, de 2% de fibra por volume.

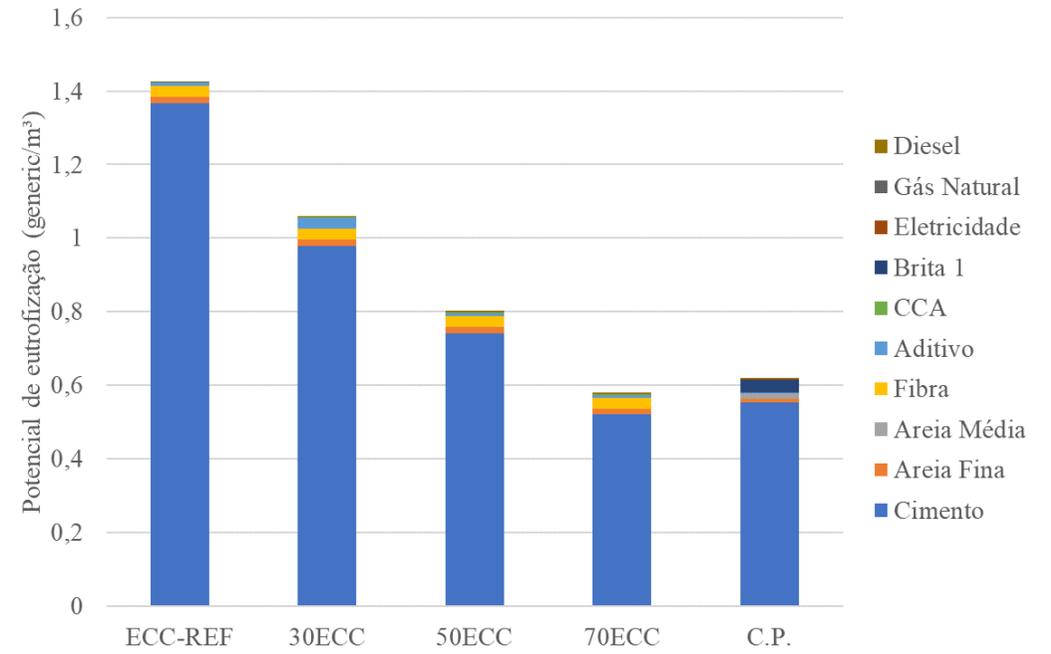
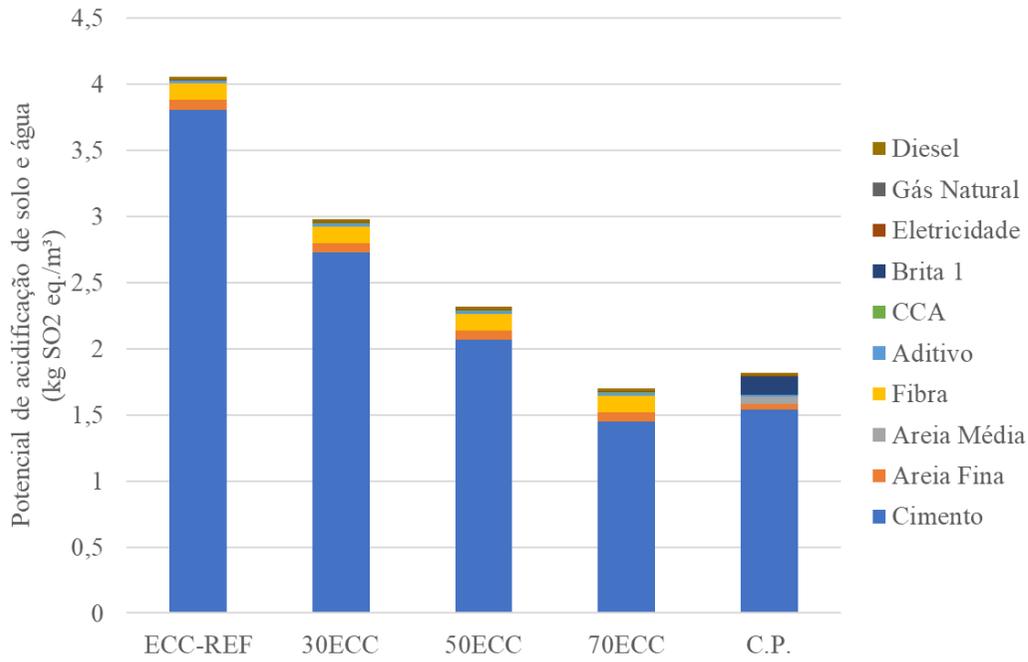
E para o traço CP (concreto pavimento) novamente foi o cimento Portland CP-V com 91% que mais impactou, seguido do diesel usado no transporte e na produção.

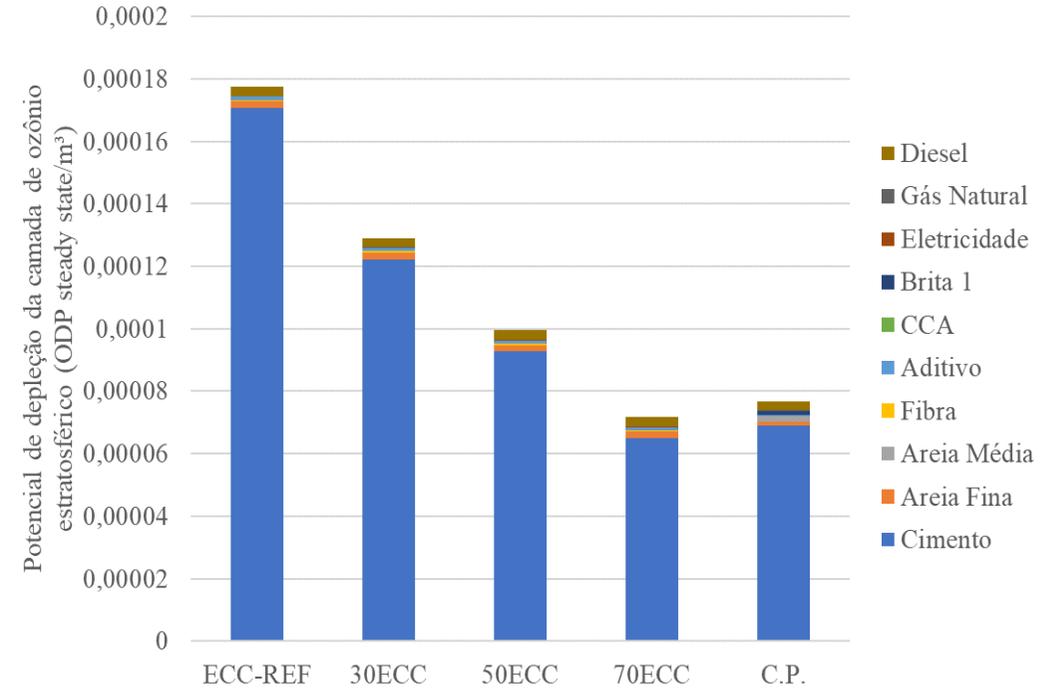
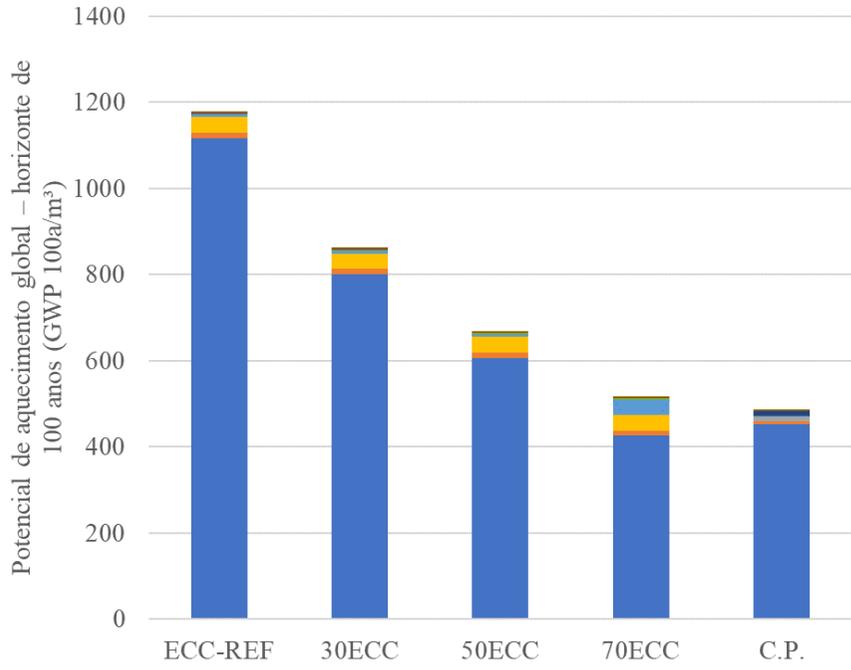
Como já mencionado, os resultados indicaram que a substituição parcial do cimento por aditivo mineral acarretou uma redução na intensidade dos indicadores de impacto calculados. A mistura do ECC referência apresentou o maior impacto ambiental, em comparação à mistura de CP, nas categorias potencial de aquecimento global, por exemplo. Porém as demais misturas de ECC contendo CCA residual diminuiram proporcionalmente os impactos conforme ocorreu o aumento de substituição.

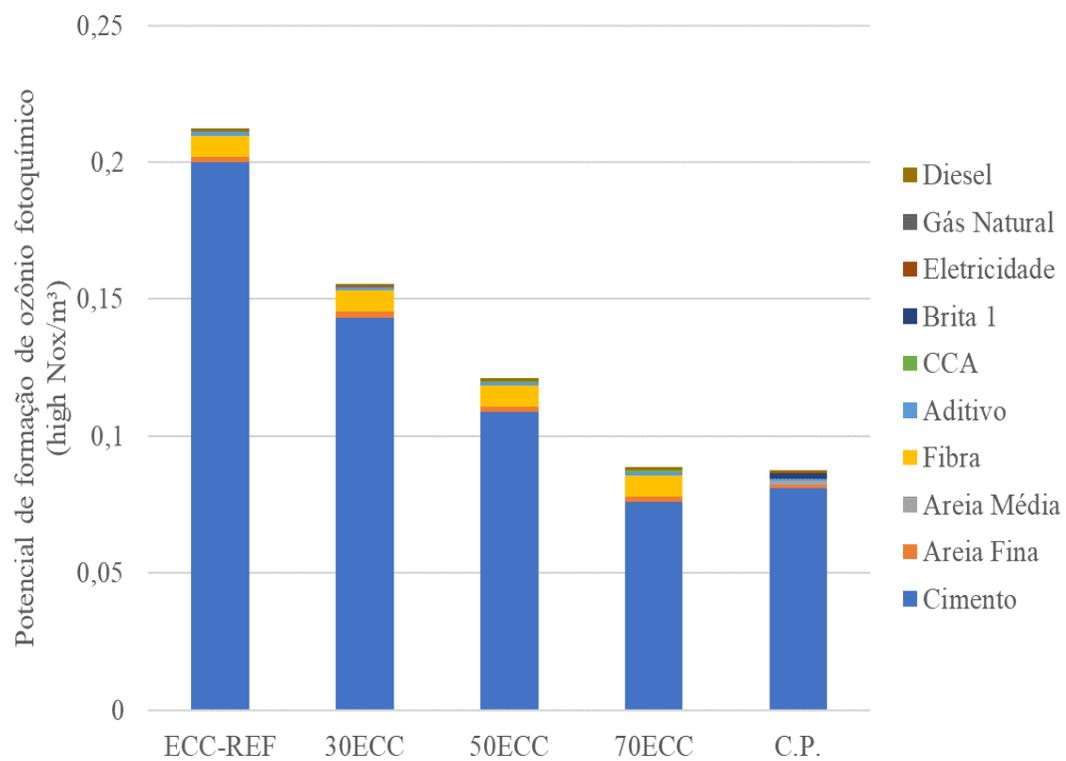
Gonçalves (2005), também observou que a substituição parcial do cimento por adições minerais diminuiu a intensidade de todos os indicadores de impactos ambientais avaliados. Mas é necessário incluir o tratamento utilizado para preparação dessa adição mineral. Cabe lembrar que neste estudo não foi considerado o consumo energético da queima da casca do arroz, que gera a CCA residual. Assim, somente, o seu transporte entre a usina agroindustrial e a concreteira foi analisado. Cabe salientar que foi desconsiderada a infraestrutura da indústria de moagem, considerando apenas o consumo de eletricidade para o beneficiamento (moagem).

Figura 68 – Gráficos da correlação das categorias de impacto para diferentes traços analisados – cenário 1









Fonte: Autoria Própria.

4.5.1 Cenário 2

Os resultados da análise de ciclo de vida do cenário 2 são expressos em termos de impactos ambientais gerados, para um horizonte de 40 anos, para cada tipo de *overlay* (recapeamento), sendo os dados derivados dos sete diferentes módulos constituintes do programa utilizado para efetuar a análise. O objetivo do cenário 2 foi comparar os impactos ambientais potenciais da utilização do ECC com diferentes porcentagens de CCA como *overlay* (recapeamento) de pavimentos rígidos comparando com *overlay* de concreto rígido.

No gráfico da Figura 69 é possível observar, considerando a análise de todas as fases (Construção, Uso e Fim de vida) para os quatro designs de *overlay*, que em todas as categorias estudadas, conforme há o aumento da substituição do cimento Portland pela CCA residual ocorre uma diminuição dos impactos gerados. Conforme o cenário 1, o cimento Portland é o material que mais impacta na produção tanto dos ECCs quanto do concreto para pavimento rígido.

Ao comparar os impactos de construção, percebe-se que o ECC-REF é o que mais impacta em relação aos demais traços estudados em todas as categorias estudadas. E que para o traço 70ECC há uma redução de impactos por volta de 46%, isto se deve ao uso da CCA residual, onde para este estudo foi considerado apenas a energia de moagem da cinza. O *overlay* de concreto rígido na fase de construção representa os impactos ambientais da ordem de 36%.

Percebe-se que durante a fase de uso, o *overlay* de CP possui mais impactos ambientais quando comparados aos *overlays* de ECC, cerca de 76%. Devido às propriedades dos ECC, que permitem assumir uma vida útil de serviço superior à de recapeamentos de concreto e de asfalto, pode-se obter uma redução dos impactos cerca de 25%, em comparação a *overlays* de concreto, ou de 65%, em relação a *overlays* de asfalto quente (GARCEZ, 2009).

Em relação ao Potencial de acidificação do solo, água, eutrofização, percebe-se a mesma tendência de comportamento, que a fase de construção é a que gera mais impactos ambientais dos *overlays* de ECC, mas que há uma redução conforme se aumenta o teor de substituição.

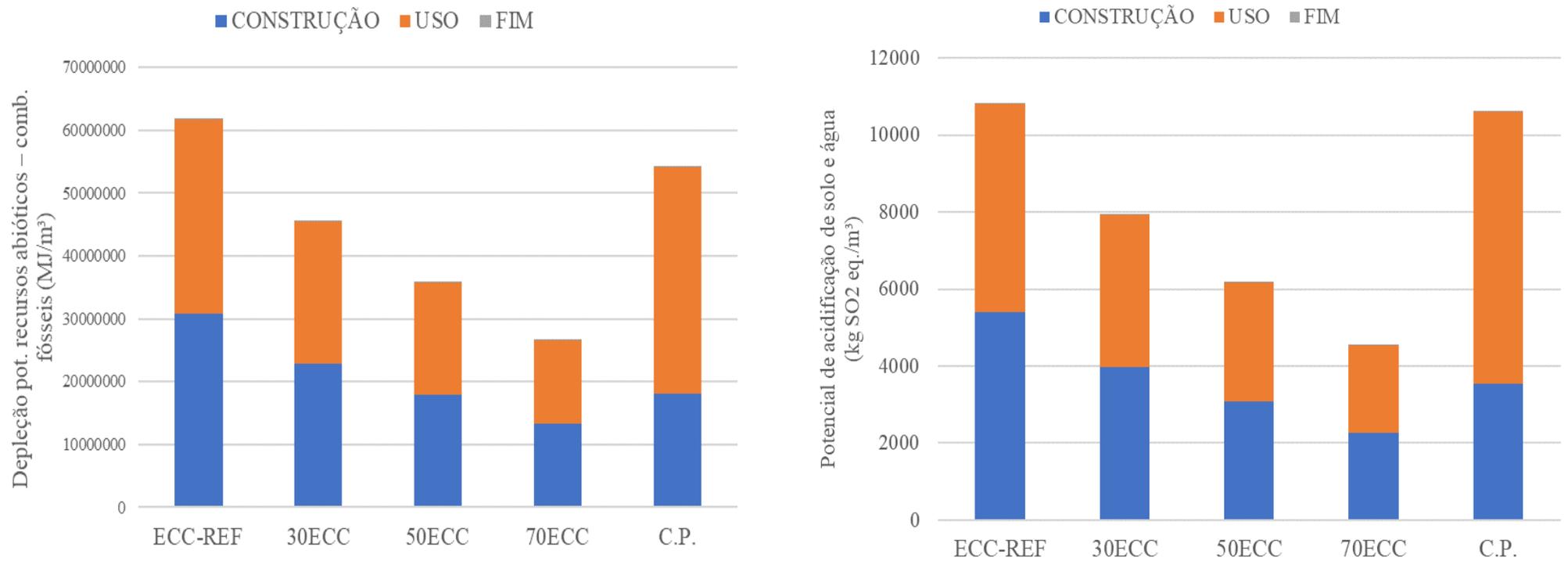
Em termos de emissões de gases nocivos à camada de ozônio, no caso dos *overlay* de concreto, elas representam 86,4% das emissões nocivas liberadas ao longo da vida útil. No caso do ECC-REF a mesma alcança 52,8%. Para o traço 30ECC emissões na ordem de 41,5%, 50ECC de 35,7% e o traço 70ECC de 27,5%. De modo geral, nota-se que o uso de

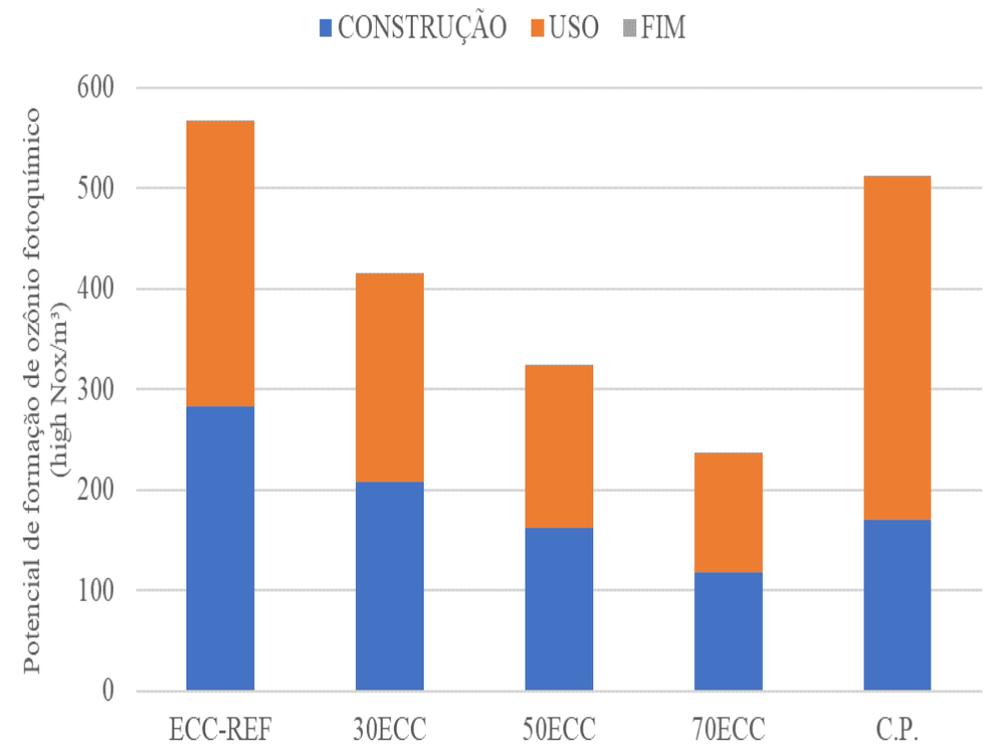
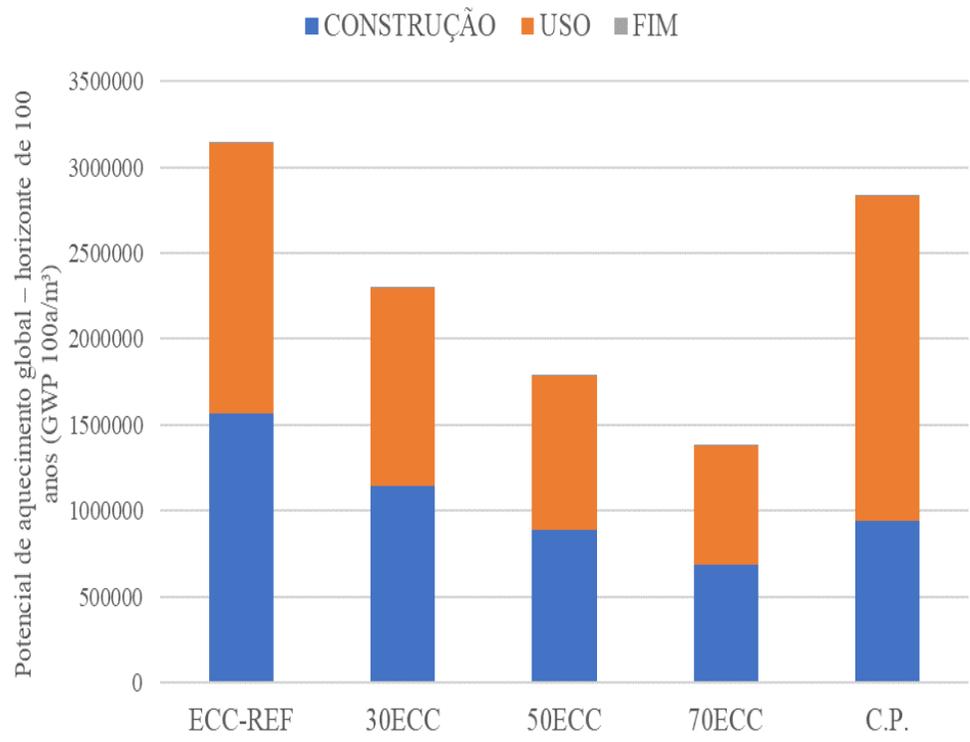
sistemas de *overlay* com ECC reduz as emissões de gases em mais de 60%, em comparação ao de concreto.

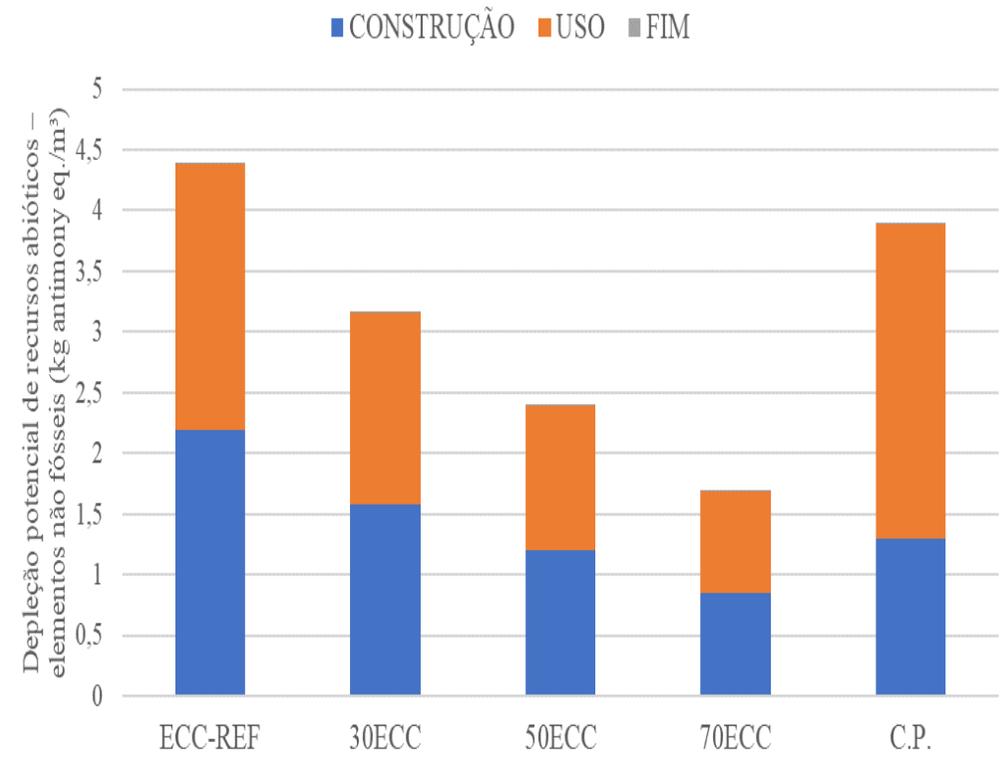
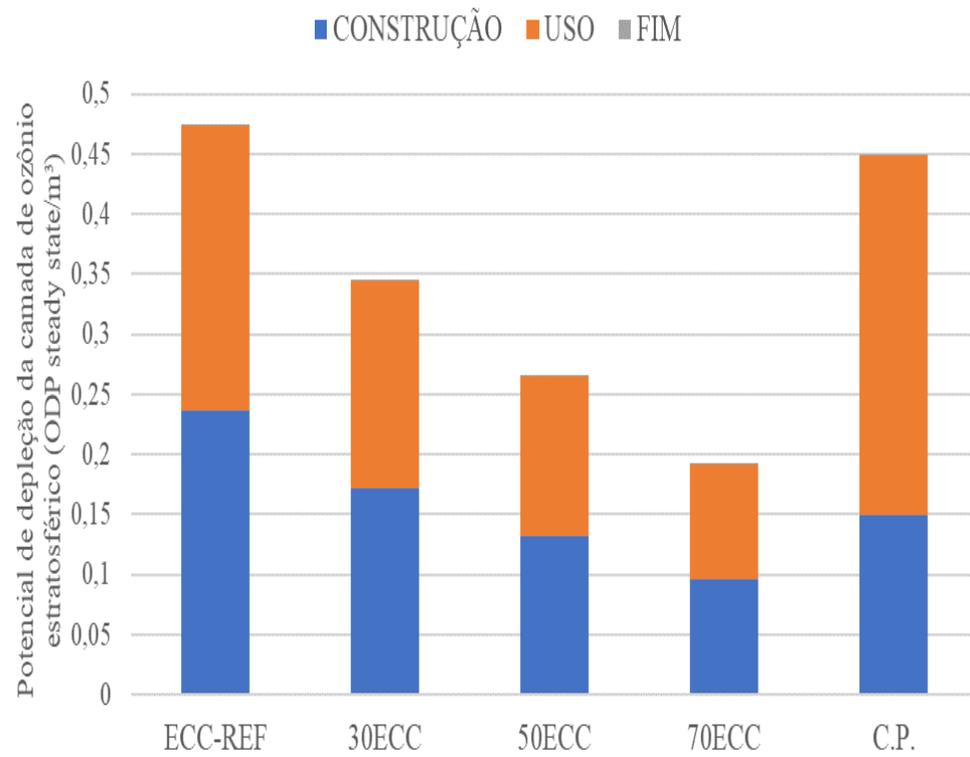
A redução das emissões de CO₂ está diretamente ligada à redução da destruição da camada de ozônio e ao efeito estufa, assim a utilização de overlays de ECC em sua fase de uso pode reduzir as alterações climáticas bastante constantes nos dias atuais. A redução dos índices do efeito estufa também o risco de doenças, principalmente doenças de pele e reduz danos a diversos tipos de materiais

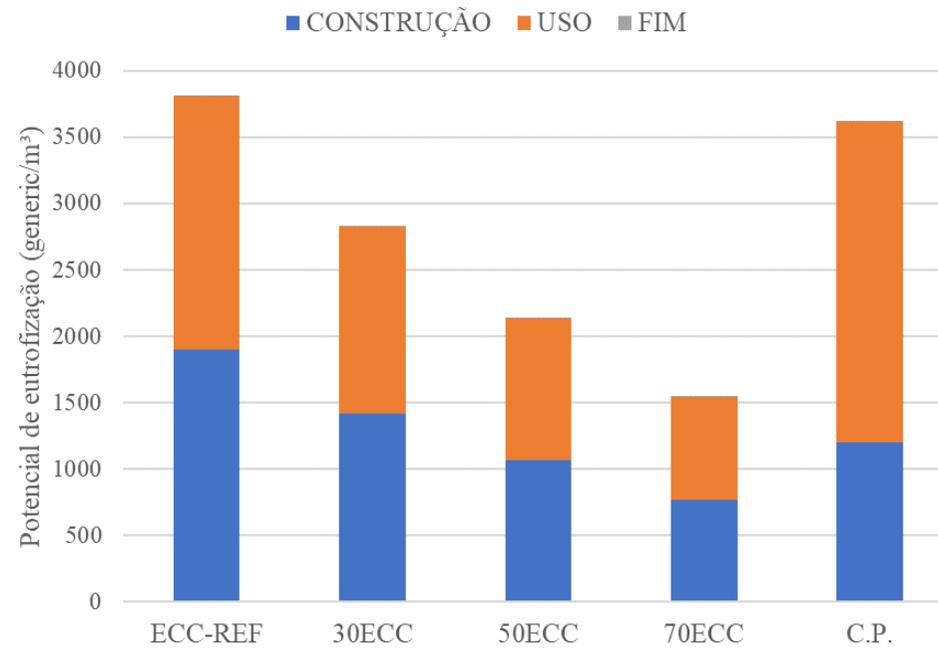
Ao analisar a fase de Fim de vida, percebe-se que para as sete categorias de impactos ambientais, e independente do traço utilizado, os impactos ambientais para esta fase ficam com menos de 1%.

Figura 69 – Gráficos da correlação das categorias de impacto para diferentes traços analisados – cenário 2









Fonte: Aatoria Própria.

O modelo de deterioração do ECC utilizado neste estudo foi desenvolvido com base no estudo proposto por Qian (2007), onde foi previsto para vida útil de 40 anos, apenas uma manutenção aos 25 anos. Já o modelo de deterioração do recampeamento de pavimento rígido, seguiu as recomendações do Manual de Recuperação de pavimentos rígidos do DNIT, publicação IPR – 37, que previu duas manutenções em 10 e 30 anos respectivamente e uma reconstrução aos 20 anos de vida útil.

Outro fator que variou foi a espessura do *overlay*, que para os de ECC foi adotado na dimensão de 120 mm e para o pavimento rígido de 175 mm de espessura. Por causa dessas definições no cenário 2 percebe-se que os *overlays* de ECC possuem impactos ambientais maiores na fase de construção, devido ao elevado consumo de cimento das misturas. E para a realização das manutenções é adotado uma quantidade de mistura muito menor que no caso do *overlay* de pavimento rígido que o modelo prevê uma reconstrução. A fase de fim de vida útil não varia em relação ao tipo de *overlay* aplicado, pois todos terão a mesma destinação.

4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA ETAPA 3

Este estudo visou compreender primeiramente como a produção de 1m³ de ECC gera de impactos ambientais, e também analisar se o processo moagem da CCA residual impactaria positivamente ou negativamente na produção dos ECCs. Cabe lembrar que foi apenas considerado a energia de moagem, desconsiderando toda a produção de queima da cinza.

Para o primeiro cenário, observa-se que os materiais que mais impactam a produção dos ECCs, é a produção do cimento Portland e a produção das fibras de polipropileno. Ao avaliar a influência da substituição do cimento por CCA residual (considerando apenas a energia de moagem), percebe-se que quase se equipara os impactos ambientais.

Os impactos mais relevantes do concreto para pavimento, também foram gerados pela produção do cimento Portland e da extração do agregado graúdo. Outro fator que pode ser observado é que a energia utilizada dentro da produção na concreteira também impacta ambientalmente na produção dos ECCs e concreto.

No segundo cenário percebe-se que quando o ECC é utilizado como um material de recapeamento em pavimentos rígidos, tem a fase de construção a que mais gera impactos ambientais. A fase de uso aparenta apresentar menores impactos ambientais em relação ao concreto para pavimento, acredita-se que seja devido as suas características mecânicas, pois possui uma estimativa de vida útil superior a 3x mais que o *overlay* de concreto. É previsto

apenas poucas manutenções na camada de revestimento, diferente do concreto rígido que além de manutenções é previsto uma reconstrução.

Ao realizar uma análise do ciclo de vida como uma possível utilização do ECC sendo aplicado como camada de *overlay* percebe-se que se torna uma alternativa atrativa, visto que se utiliza menos material para construir, já que estudos como Qian (2007) e Garcez (2009) já apontavam que camadas de *overlay* de ECC são dimensionados com uma camada bem inferior quando comparado com o *overlay* de pavimento rígido.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

A análise dos dados experimentais coletados no desenvolvimento desta pesquisa permitiu elaborar uma série de considerações, que foram apresentadas ao longo do trabalho, e que estão resumidas a seguir:

- ✓ A partir da caracterização mecânica e dos ensaios de indicativos de durabilidade desenvolvidos na etapa 1, pode-se perceber que o traço que obteve melhor equilíbrio entre esses ensaios foi o traço com 50% de CCA residual.
- ✓ Com relação aos ensaios mecânicos, observou-se que no aumento de 50% para 70% de CCA residual, o comportamento *strain-hardening* não fica tão evidente, o que consequentemente não favorece o desenvolvimento da múltipla fissuração, descaracterizando assim as principais propriedades do ECC.
- ✓ Na avaliação do desgaste abrasivo, percebe-se que independente do tipo de ECC utilizado, não há diferença significativa entre os traços, demonstrando uma resistência alta ao desgaste abrasivo superficial. Para este tipo de material, deve ser revista uma forma de aprimorar o ensaio utilizado pela norma americana ASTM C944 (2019), ou então encontrar um novo método para avaliação do desgaste abrasivo superficial dos ECC.
- ✓ Ao avaliar o ensaio de durabilidade de reação álcali-sílica, que determina qual porcentagem de CCA residual é mais indicada, percebe-se que a porcentagem de CCA no ECC depende diretamente do tipo de aplicação que se deseja para este compósito.
- ✓ No ensaio de penetração de íons cloretos, percebe-se que a CCA residual diminui a penetração de cloretos, ou seja, conforme se aumenta a porcentagem, o risco diminui de moderado para muito baixo.
- ✓ Por meio dos ensaios reológicos, pode-se notar que o traço original desenvolvido pelo grupo de pesquisa LEME/UFRGS precisa de um ajuste na sua granulometria. Os ensaios

indicaram que há um excesso de partículas grossas e uma deficiência de partículas mais finas, deixando o empacotamento das partículas descontínuo, o que descaracteriza as propriedades de micromecânica deste tipo de compósito.

✓ Em relação aos termos reológicos das misturas de ECC estudadas, é possível perceber que há necessidade de estudar com maior riqueza de detalhes a reologia, para que se possa modificar a trabalhabilidade atual do ECC em diferentes condições, para que assim possa-se compreender onde melhor deve ser empregado este tipo de material na construção civil brasileira.

✓ Por meio do ensaio de abatimento, percebe-se que ocorre um excesso de água na relação a/aglomerante das misturas de ECC, e que o aumento do aditivo não implica em melhora na trabalhabilidade destas misturas.

✓ Em relação a análise do ciclo de vida, percebe-se que a produção de ECC impacta ambientalmente em função da produção do cimento e da fibra de polipropileno, quando comparado com um concreto comum para pavimento.

✓ Quando aplicado como camada de revestimento (*overlay*), a fase de construção do ECC é a fase que mais impacta ambientalmente com relação ao seu uso e fim da vida útil.

Os ECCs associados com a CCA residual na porcentagem de 50%, tanto para ensaios mecânicos quanto de indicativos de durabilidade, se constituem de uma alternativa promissora para utilização no Brasil, como material para a construção civil. É necessário para este traço a realização de um ajuste no empacotamento de partículas, para que as propriedades de elevada capacidade de absorção de energia e de deformação sob carregamentos de tração sejam desenvolvidas, resultando na possibilidade de formação de múltiplas fissuras de pequena abertura, durante o processo de ruptura destes compósitos. Cabe lembrar que mais ensaios devem ser realizados com investigações mais específicas para o uso dos ECCs. Além disso, estas conclusões são derivadas da análise dos resultados deste trabalho, e que devem ser confirmadas e avaliadas por estudos adicionais considerando a aplicação prática do material.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho, revelou-se uma gama de possibilidades que podem ser estudadas. No intuito de dar continuidade a este trabalho, algumas sugestões são descritas para a ampliação do conhecimento dos ECCs com o uso de CCA residual e fibras de polipropileno:

- ✓ Realizar um novo estudo de empacotamento de partículas dos traços já estudados pelo grupo de pesquisa LEME/UFRGS;
- ✓ Utilizar novos materiais pozolânicos na matriz cimentícia deste compósito;
- ✓ Realizar combinações binárias de materiais pozolânicos com o intuito de melhorar a matriz cimentícia;
- ✓ Estudar o comportamento do ECC à fadiga, através de um programa amplo de ensaios sob cargas cíclicas.
- ✓ Adaptar as dosagens para uma escala real, sob condições mecânicas e ambientais, para verificação do comportamento em uma situação real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEOYE, J. T.; BEVERSLUIS, C.; MURPHY, A.; LI, V. C.; ELLIS, B. R. Physical and chemical alterations in engineered cementitious composite under geologic CO₂ storage conditions. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 83 p. 282–292, 2019.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v.16, n. 5, p. 45–52, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration**. Pennsylvania, p. 8, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C939: Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method)**. Pennsylvania, p. 3. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1399/C1399M: Standard test method for obtaining average residual-strength of fiber reinforced**. Pennsylvania, p. 6. 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, p. 6. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, p. 2. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro, p. 15. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, p. 11. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-5: Agregados – Reatividade álcali-agregado – Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, p. 11. 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, p. 24. 2017.

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

BENTUR, A.; MINDESS, S., **Fibre reinforced cementitious composites.** 2^a Edição. London: Elsevier Applied Science, 1990.

BRITO, I. S.; RAMBO, D. A. S.; MARTINI, S.; SALVADOR, R. P.; FREITAS, M. F. M. Flexural behavior of HPRCC: Enhancing post-crack strength and toughness by magnetic alignment of the reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121265–121274, 2021.

BUI, V. K.; GEIKER, M. R.; SHAH, S. P. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. **Conference of High Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPRCC4)**, p. 221–231, 2003.

CASAGRANDE, E. Q. **Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Polipropileno e com Adição de Cinza Volante: Estudo do Desempenho em Pavimentos de Concreto.**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 79. 2012.

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

CHOI, W. C.; YUN, H. D.; CHO, C. G.; FEO, L. Attempts to apply high performance fiber-reinforced cement composite (HPFRCC) to infrastructures in South Korea. **Composite Structures**, v. 109, p. 211–223, 2014.

CHOI, W. C.; YUN, H. D.; CHO, C. G.; FEO, L. Attempts to apply high performance fiber-reinforced cement composite (HPFRCC) to infrastructures in South Korea. **Composite Structures**, v. 109, p. 211–223, 2014.

COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 131. 2006.

DONIN, M. **Revestimentos de pavimentos: estudo da aderência na aplicação de compósitos cimentícios de alto desempenho para recapeamento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 67. 2015.

EMARA, M.; MOHAMED, H. A.; RIZK, M. S.; HU, J. W. Behavior of ECC columns confined using steel wire mesh under axial loading. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102809–102821, 2021.

FEI, W.; YUTONG, Y.; SHIPING, Y. Thermal and moisture performance parameters of high toughness engineered cementitious composite (ECC) with PVA fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102905–102912, 2021.

FERRARIS, C. F. Measurement of rheological properties of high performance concrete state of the art report. **National Institute of Standards and Test IR-5869**, p. 1–41, 1996.

FILHO, J. H. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto.** Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 318. 2008.

FISCHER, G., Li, V. C. Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions. **ACI Structural Journal**, v. 99 n. 6, p. 781–790, 2002.

FLATT, R. J.; BOWEN, P. Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: domain of validity of linearized Poisson-Boltzmann equation for nonideal electrolytes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 6, 781–791, 2003.

FRANÇA, M. S. **Rheological behavior of engineered cementitious composites reinforced with pva fibers.** Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 206. 2018.

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

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

GEYER, A. L. B.; SÁ, R. R. Concreto auto-adensável: Uma tecnologia a disposição da construção civil de Goiânia. Informativo técnico. **Real Mix Concreto**, Goiânia, 1 de abril de 2005. Disponível em: <http://www.realmixconcreto.com.br/downloads/informativo_realmix.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2022.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 257. 1999.

HENCHE, D.; MAZER, W. Efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas e sob a trabalhabilidade do concreto de pós-reativos. **Anais do 52° Congresso Brasileiro do Concreto**, 2010.

HOU, X.; STRUBLE, L. J.; KIRKPATRICK, R. J. Formation of ASR gel and the roles of C–S–H and portlandite. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1683–1696, 2004.

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

HUANG, T.; ZHANG, Y. X. Numerical modelling of mechanical behaviour of engineered cementitious composites under axial tension. **Computers and Structures**, v. 173, p. 95–108, 2016.

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

HUNG, C. C.; YEN, W. M. Experimental evaluation of ductile fiber reinforced cement-based composite beams incorporating shape memory alloy bars. **Procedia Engineering**, v. 79, p. 506–512, 2014.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC). **Concrete Engineering Series**, v. 82. p. 1-113, 2008.

KAMADA, T.; LI, V. C. The effects of surface preparation on the fracture behavior of ECC/Concrete repair system. **Journal of Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 6, p. 423–431, 2000.

KESNER, K.; BILLINGTON, S. L. Experimental response of precast infill panels made with DFRCC. **JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC)**, p. 289–298, 2002.

KESKINATES, M.; FELEKOG˘LU, B. The influence of mineral additive type and water/binder ratio on matrix phase rheology and multiple cracking potential of HTPP-ECC. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 508–519, 2018.

KEWALRAMANI, M. A.; MOHAMED, O. A.; SYED, Z. I. Engineered cementitious composites for modern civil engineering structures in hot arid coastal climatic conditions. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 767–774, 2017.

KONG, H. J.; BIKE, S.; LI, V. C., Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 3, p. 301–309, 2003.

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

LEPECH, M. D.; LI, V. C. Large-scale processing of engineered cementitious composites. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 4, p. 358–366, 2008.

LEPECH, M. D.; LI, V. C.; ROBERTSON, R. E.; KEOLEIAN, G. A. Design of ductile engineered cementitious composites for improved sustainability. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 567–575, 2009.

LI, V. C. Engineered Cementitious Composites (ECC): A review of the material and its applications. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1 n. 3, p. 215–230, 2003.

LI, V. C. High performance fiber reinforced cementitious composites as durable material for concrete structure repair. **Journal for Restoration of Buildings and Monuments**, v. 10, p. 163–180, 2004.

LI, V. C. Integrated structures and materials design. **Materials and Structures**, v. 40, n. 4, p. 387–396, 2007.

LI, V. C.; HORIKOSHI, T.; OGAWA, A.; TORIGOE, S.; SAITO, T. Micromechanics based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 3, p. 242–248, 2004.

LI, M.; LI, V. C. Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 3, p. 333–340, 2011.

LI, M.; LI, V. C. High-early-strength engineered cementitious composites for fast, durable concrete repair – Material properties. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 1, p. 3–12, 2011.

LI, M.; LI, V. C. Influence of material ductility on the performance of concrete repair. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 5, p. 419–428, 2009.

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

LI, M.; LI, V. C. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites. **Materials and Structures**, v. 46 n. 3, p. 405–420, 2013.

LI, M.; ŞAHMARAN, M.; LI, V. C. Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment. **Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)**, p. 313–322, 2007.

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

LI, V. C.; LI, M. Durability performance of ductile concrete structures. **8th international conference on creep, shrinkage and durability of concrete and concrete structures**, p. 761–768, 2008.

LI, V. C.; LI, M.; LEPECH, M. **High performance material for rapid durable repair of bridges and structures. 1ª Edição.** Michigan: University of Michigan, 2006.

LI V. C.; WANG, S. Flexural behavior of GFRP reinforced engineered cementitious composites beams. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 1, p.11–21, 2002.

LI, V. C.; WANG, S. Microstructure variability and macroscopic composite properties of high performance fiber reinforced cementitious composites. **Probabilistic Engineering Mechanics**, v. 21, p. 201–206, 2006.

LI, V. C.; YANG, E. H. Self-healing in concrete materials. **Self healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science: 100.** 1ª Edição. New York: Springer, 2007.

LI, V. C.; ZIJL, G. V.; WITTMANN F. Durability of strain-hardening fibre-reinforced cement-based composites. **State of the Art Report**, p. 1–139, 2010.

MA, H.; YI, C.; WU, C. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC). **Construction and Building Materials**, v. 287, p. 122719–122730, 2021.

MAALEJ, M.; HASHIDA, T.; LI, V. C. Effect of fiber volume fraction on the off-crack plane energy in strain-hardening engineered cementitious composites. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 78, n. 12, p. 3369–3375, 1995.

MAGALHÃES, M. S.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Influence of local raw materials on the mechanical behaviour and fracture process of PVA-SHCC. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 146–156, 2014.

MIYAZATO, S.; HIRAISHI, Y. Transport properties and steel corrosion in ductile fiber reinforced cement composites. **International Conference on Fracture**, p. 1500–1505, 2005.

NAAMAN, A. E. Development and evolution of tensile strain-hardening FRC composites. **Seventh RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications – BEFIB**, p. 1–28, 2008.

NEHDI, M.; MINDESS, S.; AİTCIN, P. C. Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles. **Cement and Concrete Research**, v. 28, n. 5 p. 687–697, 1998.

NEHDI, M.; RAHMAN, M. A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1993–2007, 2004.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo Arte Editorial**, p. 1–224, 2000.

OLIVEIRA, M. B. **Compósito cimentício de alta ductilidade reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá. Maringá, p. 103. 2016.

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

PARRA-MONTESINOS, G.; WIGHT, J. K. Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections. **Journal of Structural Engineering**, v. 126, n. 10, p. 1113–1121, 2000.

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

PEREIRA DA COSTA, F. B. P. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 169. 2015.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 155. 2004.

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

QIAN, S. **Influence of concrete material ductility on the behavior of high stress concentration zones**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Michigan. Ann Arbor, p. 24. 2007.

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

QIAN, S. Z.; LI, V. C.; ZHANG, H.; KEOLEIAN, G. A. Life cycle analysis of pavement overlays made with Engineered Cementitious Composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, p. 78–88, 2013.

RANA, M. M.; LEE, C. K.; AL-DEEN, S.; ZHANG, Y. X. Flexural behaviour of steel composite beams encased by engineered cementitious composites. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 143, p. 279–290, 2018.

REGINATO, L. A.; TRENTIN, L. C.; PIOVESAN, A. Z. Utilização do método do empacotamento em dosagens de concretos de alta resistência utilizando agregados britados do meio oeste catarinense. **Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto**, p. , 2010.

REIS, M. O. B.; SILVA, A. M. S. Reacções álcalis-sílica: Recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão. **Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa (Boletim Técnico. ITCM 23)**, p. 1–27, 1997.

Influência De Altos Teores De Cinza De Casca De Arroz Nas Propriedades Reológicas, Mecânicas E De Durabilidade Nos Engineered Cementitious Composites (ECC)

RIGHI, D. P. **Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 159. 2015.

RIGHI, D. P.; COSTA, F. B. P.; GRAEFF, A. G.; SILVA FILHO, L. C. P. Tensile behaviour and durability issues of engineered cementitious composites with rice husk ash. **Matéria**, v. 22, n. 2, p. 1–9, 2017.

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

ROKUGO, K.; KANDA, T.; YOKOTA, H.; SAKATA, N. Outline of JSCE recommendation for design and construction of multiple fine cracking type fiber reinforced cementitious composite (HFRCC). **Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HFRCC 5)**, p. 203–212, 2007.

ŞAHMARAN, M., LI, V. C. Durability of mechanically loaded Engineered Cementitious Composites under high alkaline environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 72–81, 2008.

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

ŞAHMARAN, M.; LI, V. C.; ANDRADE, C. Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composites beams. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 3, p. 243–250, 2008.

ŞAHMARAN, M.; LI, M.; LI, V. C. Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 6, p. 604–611, 2007.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: Fundamentos teóricos e práticos**. 1ª Edição. São Paulo: Artiliber, 2006.

SICHERI, P. E.; PABLOS, J. M.; FERREIRA, O. P.; ROSSIGNOLO, J. A.; CARAM, R. **Materiais de construção**. 1ª Edição. São Carlos: USP, 2008.

SILVA, F. B.; YOSHIDA, O. S.; SAADE, M. R. M.; SILVA, V. G.; SILVA, M. G.; MORAGA, G; L.; PASSUELLO, A.; OLIVEIRA, L. A.; JOHN, V. M. Avaliação do ciclo de vida do concreto dosado em central com base em dados da indústria brasileira. **Concreto & Construções**. v. 98, p. 91–97, 2020.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali – agregado**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 227. 2007.

TANNER R. I. **Engineering rheology**. 1ª Edição. New York: Oxford University Press, 1986.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh concrete**. 1ª Edição. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1983.

THOMAS, M. The effect of supplementary cementing materials on alkali–silica reaction: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1224–1231, 2011.

THOMAS, M. D. A.; SHEHATA, M. H. Use of blended cements to control expansion of concrete due to alkali–silica reaction. **8th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete**, p. 591–607, 2004.

TIBONE, R. **A utilização da cinza de casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Estruturas, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 196. 2007.

TRINDADE, G. H. **Durabilidade do concreto com cinza de casca de arroz natural sem moagem: mitigação da reação álcali-silica e penetração de cloretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p. 200. 2011.

TRINDADE, G. H. **Influência da incorporação de cinza da casca do arroz e de sílica ativa no cimento Portland frente à reação álcali-silica.** Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 178. 2015.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 149. 2004.

UCHIKAWA, H.; HANEHARA, S.; SAWAKI, D. The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 1, p. 37–50, 1997.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 196. 2004.

WANG, S; LI, V. C. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. **ACI Materials Journal**, v.104, n.3, p. 233–240, 2007.

WANG, S.; LI, V. C. High early strength engineered cementitious composites. **ACI Materials Journal**, v. 103, n. 2, p. 97–105, 2006.

WANG, S.; LI, V. C. Materials design of lightweight PVA-ECC. **Proceedings of HPFRCC**, p. 379-390, 2003.

YANG, E. H.; YANG, Y.; LI, V. Use of high volumes of fly ash improve ecc mechanical properties and material greenness. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 6, p. 620–628, 2007.

YANG, Y.; LEPECH, M.; LI, V. C. Self-healing of engineered cementitious composites under cyclic wetting and drying. **International Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads (CMCL)**, p. 231–242, 2005.

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

ZANGHELINI, G. M.; CHERUBINI, E.; GALINDRO, B. M.; ALVARENGA, R. A. F. A aplicação da avaliação do ciclo de vida no brasil na última década. **IV Congresso Brasileiro Sobre Gestão Pelo Ciclo de Vida**, p. 1–9, 2014.

ZHANG, W. Research progress of advanced cementitious composites. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 651, p. 1–8, 2021.

ZHANG, W.; YIN, C.; MA, F.; HUANG, Z. Mechanical properties and carbonation durability of engineered cementitious composites reinforced by polypropylene and hydrophilic polyvinyl alcohol fibers. **Materials**, v. 11, n. 7, p. 1107–1147, 2018.

ZHANG, Y. M.; SUN, W.; YAN, H. D. Hydration of high-volume fly ash cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 6, p. 445–452, 2000.

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

ZHU, Y.; ZHANG, Z.; YANG, Y.; YAO, Y. Measurement and correlation of ductility and compressive strength for Engineered Cementitious Composites (ECC) produced by binary and ternary systems of binder materials: Fly ash, slag, silica fume and cement. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 192–198, 2014.