

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Vanessa Pasinatto

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DO
ECC (ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES)
COMO REPARO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
DETERIORADAS PELA CORROSÃO DA ARMADURA

Porto Alegre
Dezembro 2018

VANESSA PASINATTO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DO
ECC (ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES)
COMO REPARO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
DETERIORADAS PELA CORROSÃO DA ARMADURA**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coorientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre
Dezembro 2018

VANESSA PASINATTO

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO POTENCIAL DO
ECC (ENGINEERED CEMENTITOUS COMPOSITES)
COMO REPARO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO
DETERIORADAS PELA CORROSÃO DA ARMADURA**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenação da atividade de ensino - Trabalho de Conclusão de Curso II - Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2018

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

Profa. Ângela Gaio Graeff
PhD pela University of Sheffield
Coorientadora

Profa. Mônica Regina Garcez
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Relatora

BANCA EXAMINADORA

**Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
(UFRGS)**
PhD pela University of Leeds

Profa. Mônica Regina Garcez (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela University of Sheffield

MSc. Lucas Alexandre Reginato (UFRGS)
MSc. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Joel e Adriana,
e minha irmã, Cássia, que estiveram ao meu lado e
me apoiaram durante toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que nunca me faltou.

A minha família, em especial aos meus pais, Joel e Adriana, pela base, educação e dedicação constante. Agradeço também a minha irmã, Cássia, minha melhor amiga, por todo carinho e parceria. Amo vocês!

Ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), em especial a Débora por ter acreditado e confiado em mim na entrevista para bolsista de Iniciação Científica, obrigada por todo o conhecimento passado e pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos colegas de laboratório que se tornaram meus amigos (Gabrielle, Suriane, Daniele, Luciane, Ângelo, Mathias e Gustavo). Agradeço aos bolsistas de Iniciação Científica que me auxiliaram e, em especial, o Ronaldo e Victor, que colocaram a mão na massa e me ajudaram desde o início deste trabalho.

Agradeço também ao Sr. Fontes e Sr. Edgar, pelo suporte nos equipamentos e instalações necessárias. Agradeço de coração ao Sr. José, grande auxiliar do LEME, que sempre esteve disposto a ajudar no que fosse preciso. Kássio e Lucas, muito obrigado pela ajuda durante os ensaios e pelas conversas de aconselhamento.

Ao meu orientador Prof. Luiz Carlos e minha coorientadora Prof.^a Ângela, por todo conhecimento compartilhado, pela dedicação e paciência durante a orientação deste trabalho, que me incentivou e despertou o interesse pela continuidade na área de pesquisa acadêmica.

Agradeço também a empresa ArcelorMittal, pela doação do aço utilizado na pesquisa. A empresa CAAL (Alegrete/RS) pelo fornecimento da cinza de casca de arroz. E a empresa Brasilit Saint-Gobain pela doação das fibras de polipropileno.

Agradeço as minhas amigas de infância, Luiza e Bruna, pelas palavras de incentivo de que tudo iria dar certo.

Agradeço ao meu namorado Alex, que apesar da distância, me acompanhou e incentivou durante todos estes anos de graduação.

Por fim, agradeço minha prima Virgínia por todos os conselhos dados e por acreditar sempre no meu potencial, sem ela eu não teria tido a oportunidade de completar minha graduação em Engenharia Civil na UFRGS.

O que separa os bem-sucedidos dos outros é a persistência.

Lisa M. Amos

RESUMO

Apesar do avanço tecnológico crescente na construção civil, o problema de deterioração das estruturas é ainda muito presente nos dias atuais. Dentre as manifestações patológicas em elementos de concreto armado, destaca-se a corrosão da armadura por sua elevada ocorrência e potencial de dano. De modo a prolongar a vida útil das estruturas já existentes, vem se estudando novos materiais e técnicas construtivas para intervenção de restauração das mesmas, como reparo e proteção. Nos últimos anos, vem sendo desenvolvido um tipo especial de compósito cimentício de elevada capacidade de deformação, reforçado com fibras, chamado de Engineered Cementitious Composite (ECC), que tem como principal característica a alta ductilidade, devido à propensão de gerar múltiplas fissuras quando em carregamento. Introduzindo esta pesquisa no Brasil e adaptando o ECC com materiais locais, o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) criou um grupo de pesquisa que há mais de uma década vem contribuindo com o conhecimento científico, em busca de estratégias economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Embora o ECC apresente características especiais que permitem o seu uso para diversas aplicações, a ênfase atual, principalmente nas pesquisas desenvolvidas no LEME, se encontra no estudo da utilização deste material como alternativa para pavimentação, e pouco se voltou para a aplicação em estruturas. Buscando aliar o bom comportamento dúctil do ECC e a lacuna bibliográfica, este trabalho visa à utilização deste material como reparo em vigas de concreto armado convencional, deterioradas pela corrosão, de forma a analisar o comportamento mecânico deste elemento de concreto armado e ECC. Desta forma, busca-se avaliar o comportamento frente à resistência mecânica 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. Dando ênfase na sustentabilidade, e com o intuito de tornar o ECC um material mais sustentável, avaliou-se um novo traço com a substituição de 50% de cimento por cinza de casca de arroz. Os resultados da pesquisa mostram, em suma, que o ECC apresentou 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. Entretanto, constatou-se que a utilização do ECC como reparo de estruturas não se mostrou viável quando comparado às argamassas de reparo comercializadas no mercado, por se tratar de um material com um custo elevado e não apresentar uma boa trabalhabilidade.

Palavras-chave: reparo de estruturas; compósito cimentício; cinza de casca de arroz.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho	18
Figura 2 – Fluxograma do programa experimental	19
Figura 3 – Distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas	22
Figura 4 – Influência da manutenção na curva de degradação no tempo.....	24
Figura 5 – Comparativo do processo de fissuração entre um concreto convencional e um ECC	26
Figura 6 – Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características do ECC e de um concreto convencional	27
Figura 7 – Fissuração do material de reparo e delaminação da interface devido à contração diferencial.....	31
Figura 8 – Formação das zonas catódicas e anódicas na armadura.....	34
Figura 9 – Esforços produzidos que levam à fissuração e destacamento do concreto	36
Figura 10 – Esquema do programa experimental.....	39
Figura 11 – Curva granulométrica da brita.....	41
Figura 12 – Curva granulométrica da areia fina	42
Figura 13 – Curva granulométrica da areia média	43
Figura 14 – Casca de arroz e cinza sem controle de queima.....	44
Figura 15 – Detalhamento da armadura	46
Figura 16 – Dispersão da Fibra de Polipropileno	47
Figura 17 - Croqui do ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos	48
Figura 18 – Configuração dos equipamentos para realizar os ensaios de resistência à tração na flexão em vigas quatro pontos.....	49
Figura 19 – Execução do ensaio de penetração de íons cloretos.....	50
Figura 20–Configuração da armadura	52
Figura 21 – Detalhe do fio da armadura com o fio de cobre amarrado.....	52
Figura 22 – Separação do material utilizado na concretagem.....	53
Figura 23 – Armaduras posicionadas e prontas para concretagem	53
Figura 24 - Ensaio de abatimento de tronco cone	54
Figura 25 – Fases da concretagem das vigas de concreto armado	54
Figura 26 – Configuração geral do ensaio de corrosão	56
Figura 27 – Esquema de ligação dos corpos-de-prova com a fonte de alimentação (vista superior).....	57

Figura 28 – Fontes calibradas com 320 mA de corrente contínua	57
Figura 29 – Detalhe das ligações das vigas	57
Figura 30 – Gabarito em acrílico para verificar o nível da solução	58
Figura 31 – Face inferior das vigas após o ensaio de CAIM.....	59
Figura 32 – Face inferior das vigas após a limpeza do produto da corrosão.....	59
Figura 33 – Viga após a remoção do concreto para execução do reparo	60
Figura 34 – Limpeza da armadura antes do reparo	61
Figura 35 – Fixação das chapas nas laterais das vigas	61
Figura 36 – Etapas do reparo das vigas em ECC	62
Figura 37 – Corpo de prova instrumentado e pronto para iniciar o ensaio	64
Figura 38 – Sistema de coleta de dados para o ensaio de módulo de elasticidade.....	64
Figura 39 – Preparação dos corpos de prova para a concretagem.....	65
Figura 40 – Corpo de prova durante o ensaio de aderência pelo método de cisalhamento.....	66
Figura 41 - Croqui do ensaio de flexão a quatro pontos nas vigas.....	66
Figura 42 – Detalhe do posicionamento dos LVDTs	67
Figura 43 – Sistema de coleta de dados para o ensaio de flexão.....	68
Figura 44 – Sistema de coleta de dados para o ensaio de flexão.....	68
Figura 45 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na vertical	71
Figura 46 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na lateral	71
Figura 47 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na vertical	72
Figura 48 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na lateral	72
Figura 49 – Correntes médias (A) obtidas no ensaio de penetração de íons cloretos	73
Figura 50 – Valores médios de absorção de água e índice de vazios.....	74
Figura 51 – Ruptura média dos corpos de prova à compressão	75
Figura 52 – Gráfico tensão x deformação dos concretos.....	76
Figura 53 – Ruptura dos corpos de prova.....	77
Figura 54 – Gráfico com as cargas máximas das vigas.....	77
Figura 55 – Gráfico da carga aplicada em função dos deslocamentos no centro do vão	78
Figura 56 – Vigas após ensaio de flexão	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estrutura cronológica do conhecimento sobre CCA	29
Tabela 2 – Níveis de deterioração de elementos de concreto armado sujeitos à corrosão de armadura	37
Tabela 3 – Nomenclatura e quantidade das vigas	40
Tabela 4 – Composição granulométrica da brita	41
Tabela 5 – Composição granulométrica da areia fina	42
Tabela 6 – Composição granulométrica da areia média.....	43
Tabela 7 – Características químicas e físicas da cinza de casca de arroz (CCA).....	45
Tabela 8 – Comprimento e diâmetro das barras de armadura utilizadas nos experimentos.....	46
Tabela 9 – Características da fibra de polipropileno	47
Tabela 10 – Traço concreto convencional	51
Tabela 11 – Traço ECC com 50% de CCA	60
Tabela 12 – Estratégia experimental compressão uniaxial.....	63
Tabela 13 – Cargas Q médias e avaliação qualitativa da penetrabilidade de íons cloreto	73
Tabela 14 – Massa das barras após a limpeza	79

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACE-MRL – *Advanced Civil Engineering - Materials Research Laboratory*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada

CEB – *Comité Eurointernacional du Beton*

CCA – Cinza de Casca de Arroz

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

DECIV – Departamento de Engenharia Civil DNIT

EE – Escola de Engenharia

ECC – *Engineered Cementitious Composite*

FRC – *Fiber Reinforced Concrete*

HPFRCC – *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

NBR – Norma Brasileira

PVA – Álcool Polivinílico

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VU – Vida Útil

VUP – Vida Útil de Projeto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	16
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo Principal.....	16
2.2.2 Objetivos Secundários.....	16
2.3 PRESSUPOSTO.....	17
2.4 PREMISA.....	17
2.5 DELIMITAÇÕES.....	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO.....	18
2.8 ESTRATÉGIA DE PESQUISA	19
3 DESAFIOS DE ASSEGURAR A VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS.....	20
3.1 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL	20
3.2 DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	21
3.3 MANUTENÇÃODAS ESTRUTURAS CIVIS	22
4 POTENCIAL DO ENGINEERED CIMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) PARA REPARO DE ESTRUTURAS.....	25
4.1 ENGINEERED CIMENTITIOUS COMPOSITES (ECC).....	25
4.2 AVANÇOS PARA TORNAR O ECC MAIS SUSTENTÁVEL “GREENER ECC”	28
4.3 UTILIZAÇÃO DO ECC PARA REPARO DE ESTRUTURAS.....	30
5 REPARO DE ESTRUTURAS CORROÍDAS	33
5.1 TIPOS DE CORROSÃO E MODELAGEM DO PROCESSO CORROSIVO	33
5.2 PRINCIPAIS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS AFETADAS PELA CORROSÃO DA DE ARMADURAS	35
5.3 ANÁLISE E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS CORROÍDAS	36
6 MÉTODO DE PESQUISA	39
6.1 MATERIAIS EMPREGADOS	40
6.1.1 Agregado graúdo.....	40
6.1.2 Agregado miúdo.....	41
6.1.2.1 Areia fina.....	41
6.1.2.2 Areia média.....	43
6.1.3 Cimento.....	44
6.1.4 Cinza de Casca de Arroz.....	44
6.1.5 Barras de aço.....	45

6.1.6 Fibra de Polipropileno.....	46
6.1.7 Aditivo.....	47
6.2 ENSAIOS PRELIMINARES	48
6.2.1 Flexão a Quatro Pontos.....	48
6.2.2 Migração Íons Cloretos.....	49
6.2.3 Absorção e Índice de Vazios.....	50
6.3 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA.....	51
6.3.1 Traço do concreto convencional.....	51
6.3.2 Montagem das armaduras.....	51
6.3.3 Concretagem e moldagem dos corpos de prova.....	52
6.4 CORROSÃO ACELERADA	55
6.5 REPARO DAS VIGAS ATACADAS PELA CORROSÃO.....	59
6.5.1 Traço do ECC.....	59
6.5.2 Preparação das Vigas.....	60
6.5.3 Concretagem do ECC e processo de reparo.....	61
6.6 MÉTODOS E ENSAIOS	62
6.6.1 Compressão Uniaxial.....	62
6.6.2 Módulo de Elasticidade.....	63
6.6.3 Aderência pelo Método de Cisalhamento.....	65
6.6.4 Flexão a quatro pontos.....	66
6.6.5 Determinação da perda de massa.....	68
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
7.1 ENSAIOS PRELIMINARES	70
7.1.1 Flexão a Quatro Pontos.....	70
7.1.2 Migração Íons Cloretos.....	72
7.1.3 Absorção e Índice de Vazios.....	73
7.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO REPARO	74
7.2.1 Compressão uniaxial.....	74
7.2.2 Módulo de elasticidade.....	75
7.2.3 Aderência pelo método de cisalhamento.....	76
7.2.4 Flexão a quatro pontos.....	77
7.2.5 Determinação da perda de massa das barras.....	79
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80
REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Apesar da constante evolução na área da construção civil, ainda há muitas limitações a respeito da incerteza quanto ao comportamento de uma estrutura exposta ao tempo. Em decorrência disso, o conceito de vida útil das estruturas vem sendo bastante estudado nos últimos anos, pois a preocupação, atualmente, não está somente voltada ao dimensionamento das seções estruturais, mas também, com a durabilidade destes elementos.

O conhecimento relacionado à Patologia das Construções vem avançando com o tempo, por meio da análise das diversas origens que causam o sistema de deterioração das estruturas. Dentre as manifestações patológicas em elementos de concreto armado, destaca-se a corrosão da armadura por sua elevada ocorrência e potencial de dano. De modo a prolongar a vida útil das estruturas já existentes, vem se estudando novos materiais e técnicas construtivas para intervenção de restauração das mesmas, como reparo e proteção.

Nos últimos anos, vem sendo desenvolvido um tipo especial de compósito cimentício de elevada capacidade de deformação, reforçado com fibras, chamado de Engineered Cementitious Composite (ECC), que tem como principal característica a alta ductilidade, devido à propensão de gerar múltiplas fissuras quando em carregamento.

Introduzindo esta pesquisa no Brasil e adaptando o ECC com materiais locais, o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) criou um grupo de pesquisa que há mais de uma década vem contribuindo com o conhecimento científico, em busca de estratégias economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. O grupo já obteve resultados promissores com a utilização de fibras de polipropileno (em substituição às fibras de PVA) em conjunto com cinzas volantes e cinza da casca de arroz (CCA). Garcez (2009), em sua tese de doutorado sobre a investigação do comportamento do ECC reforçado com fibras de polipropileno como material para recapeamento de pavimentos, já testou a fibra de polipropileno em substituição à fibra de PVA, inicialmente, usada na concepção do compósito (LI, 2003). O trabalho também contou com a substituição parcial do cimento por cinza volante.

Posteriormente, dois trabalhos de mestrado foram concebidos pelo grupo, sendo o primeiro, desenvolvido por Righi (2015), e visou o estudo de caracterização do material, avaliando o comportamento mecânico destes compósitos. Este estudo mostrou o potencial da utilização de materiais cimentícios complementares, como a cinza de casca de arroz (CCA) com queima não controlada, moída em laboratório em substituição do cimento. O segundo trabalho, desenvolvido por Pereira da Costa (2015), foca na análise da durabilidade e alguns processos de deterioração que podem afetar o ECC, voltando-se mais a estruturas de concreto armado em edificações e pavimentos. Esta pesquisa também utilizou fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz como materiais alternativos na mistura.

O ECC apresenta características especiais que permitem o seu uso para diversas aplicações, muito embora, a ênfase atual, principalmente nas pesquisas desenvolvidas no LEME, se encontra no estudo da utilização deste material como alternativa para pavimentação, e pouco se voltou para a aplicação em estruturas. Quando o ECC é usado como material de reparo, sua alta ductilidade e o comportamento de múltipla fissuração podem liberar as tensões induzidas pela deformação diferencial, causando fissuras no ECC, em vez da delaminação da interface (LI E LI, 2009). Além disso, as pequenas espessuras de fissura no ECC podem reduzir, significativamente, a penetração de água, oxigênio, cloretos, álcalis ou sulfatos no sistema de reparo. Portanto, além de melhorar o desempenho mecânico da estrutura, o ECC também contribui para um possível aumento na durabilidade dos reparos de concreto.

Buscando aliar o bom comportamento dúctil do ECC e a lacuna bibliográfica, este trabalho visa à utilização deste material como reparo em vigas de concreto armado convencional, deterioradas pela corrosão, de forma a analisar o comportamento mecânico deste elemento de concreto armado e ECC.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes da pesquisa que conduzem este trabalho estão descritas neste capítulo.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho: “é possível a utilização de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação como reparo de vigas de concreto armado?”.

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos desta pesquisa se dividem em principal e secundários, conforme descritos na sequência.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é analisar a aplicação dos Engineered Cementitious Composites (ECC), com utilização de fibra de polipropileno e cinza de casca de arroz, como material de reparo em vigas de concreto armado atacadas pela corrosão da armadura. Desta forma, busca-se avaliar o comportamento frente à resistência mecânica 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.

2.2.2 Objetivos Secundários

Definiram-se, como objetivos secundários deste trabalho:

- a) Caracterizar o ECC com 50% (em volume de cimento) de substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz, comparando com os teores já estudados anteriormente, para encontrar a porcentagem ideal de substituição nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.
- b) Investigar através do ensaio de flexão a quatro pontos se o ECC irá ter uma boa aderência com o concreto convencional, não deslocando quando submetido a um esforço de tração na flexão.

2.3 PRESSUPOSTO

Este trabalho tem por pressuposto que a utilização do ECC como reparo de vigas de concreto armado será adequado para recuperar o desempenho mecânico inicial de estruturas que sofreram corrosão da armadura.

2.4 PREMISSE

O trabalho tem a premissa de que os estudos já realizados, em especial no LEME, sobre a utilização do Engineered Cementitious Composites (ECC) estão mais voltados para a aplicação deste material como alternativas para pavimentação, não apresentando muitas informações sobre a utilização deste compósito como reparo de estruturas, tampouco a utilização deste como reparo de estruturas degradadas pela corrosão.

2.5 DELIMITAÇÕES

A pesquisa delimita-se à análise da utilização de ECC como reparo de vigas de concreto armado quando submetidas a um processo de corrosão de armaduras, frente ao ensaio de flexão.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

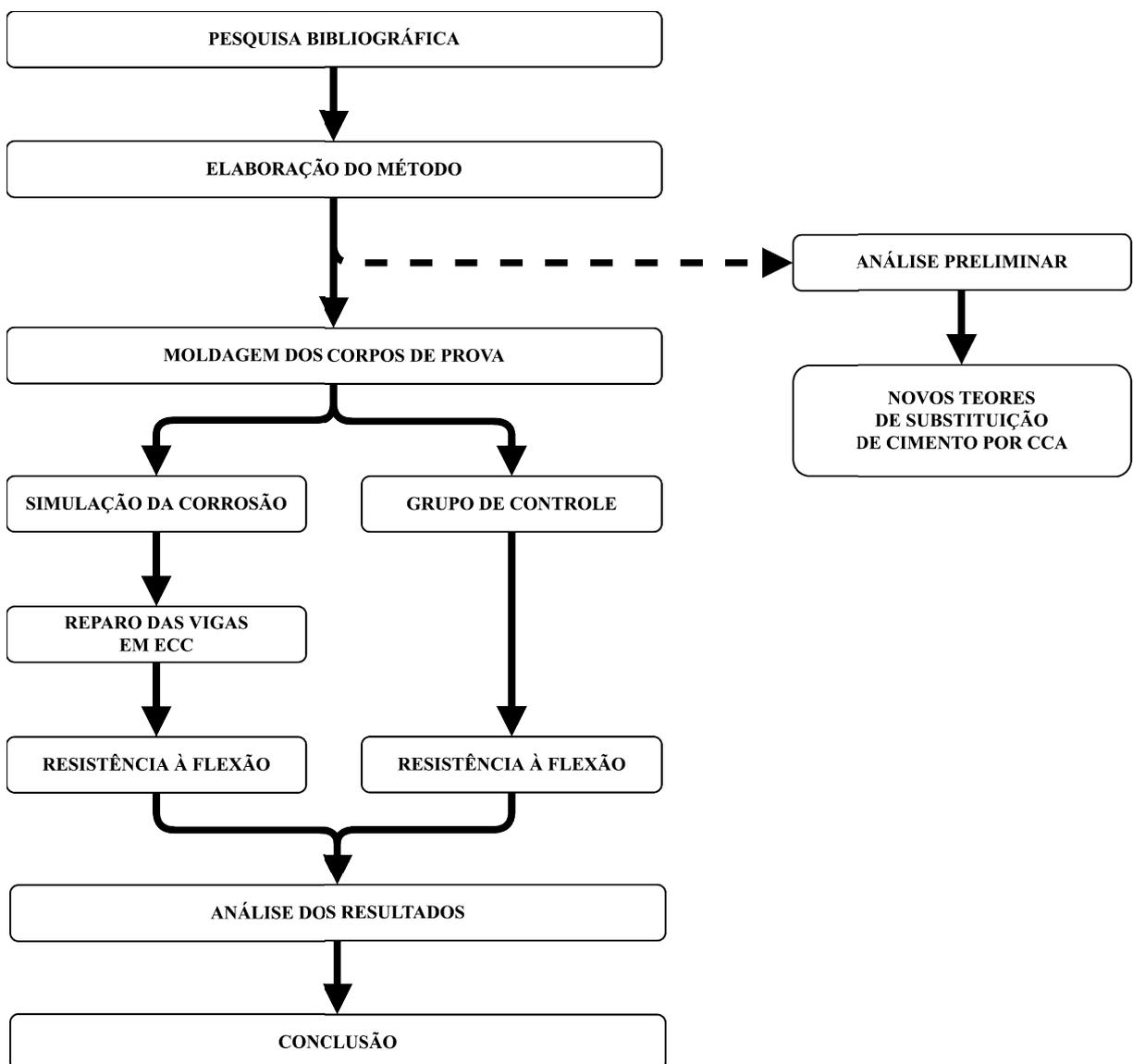
- a) a utilização de um único traço de concreto, definido pelo valor da resistência à compressão média igual a 30 MPa. Não serão estudados concretos de maior resistência, pois apresentam baixa porosidade, o que dificultaria a passagem de corrente nos corpos de prova para simular a corrosão;
- b) o estudo de apenas uma geometria de viga de concreto armado, nas dimensões de 7 x 14 x 130 cm;
- c) a utilização de um único grau de corrosão: serão estudadas armaduras com aproximadamente 5% de perda de massa no programa experimental;
- d) o uso de apenas uma técnica para aceleração de corrosão foi utilizada, baseando-se na metodologia do ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) com aplicação de corrente constante. Salienta-se que ainda não existe correlação entre essa técnica e o processo de corrosão que acontece em estruturas reais;

- e) a análise dos elementos de concreto com reparo em ECC será em termos de resistência mecânica pelo ensaio de flexão das vigas.

2.7 DELINEAMENTO

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com os estágios apresentados no fluxograma da Figura 1 que permite uma melhor visualização das etapas constituintes da pesquisa de forma a proporcionar o entendimento global do trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho

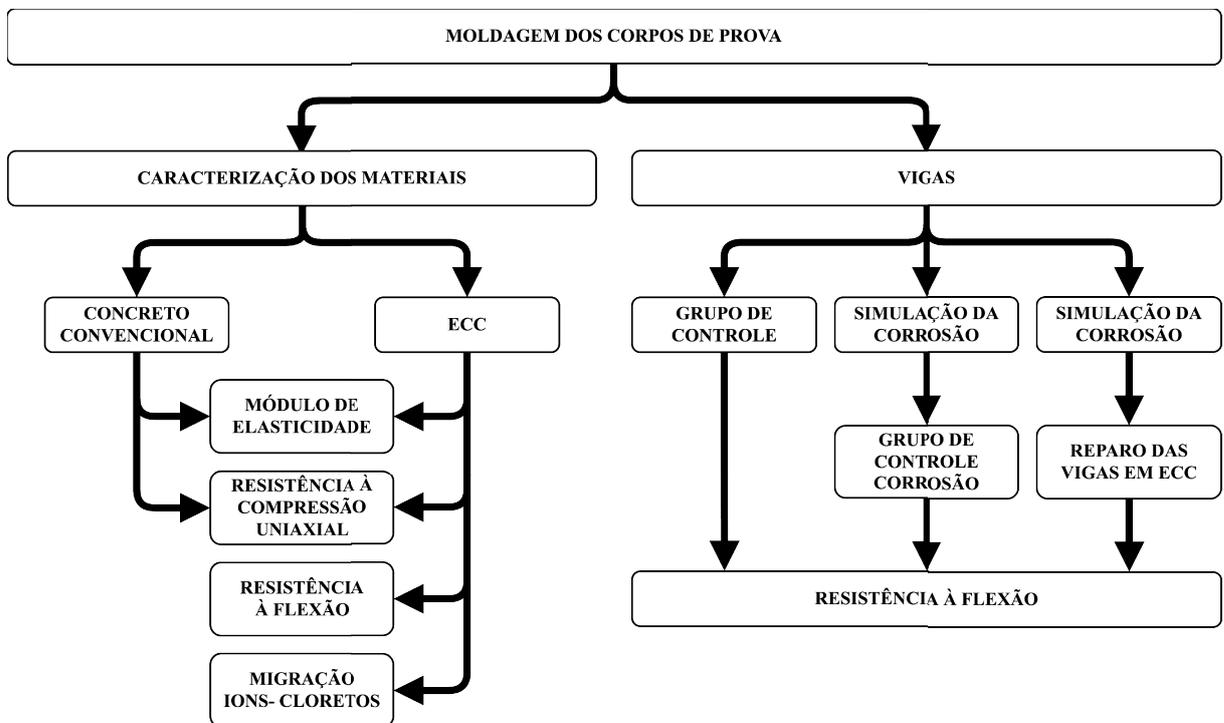


(Fonte: elaborado pelo autor)

2.8 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

O presente trabalho se propõe a analisar o ECC como material de reparo de estruturas corroídas. Para tal, será feita a caracterização dos dois materiais utilizados na confecção das vigas, concreto convencional e ECC. Além disso, as vigas passaram por três diferentes processos e por fim será feita a análise do comportamento mecânico destes corpos de prova quando submetidos ao ensaio de flexão. O fluxograma da Figura 2 permite a visualização do programa experimental da pesquisa, a fim de proporcionar o melhor entendimento de todos os procedimentos que serão executados.

Figura 2 – Fluxograma do programa experimental



(Fonte: elaborado pelo autor)

3 DESAFIOS DE ASSEGURAR A VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos sobre durabilidade, vida útil e desempenho das edificações e de seus sistemas construtivos. Posteriormente, serão apresentados os sistemas de degradação das estruturas de concreto armado e sua principal manifestação patológica, além disso, serão abordadas as formas e exigências para manutenção destas estruturas.

3.1 DURABILIDADE E VIDA ÚTIL

As edificações são construídas para atender os requisitos funcionais para os quais foram projetadas por um longo período de tempo, resistindo aos agentes ambientais e de uso, devendo apresentar condições adequadas para atender as exigências dos seus usuários. Um grande avanço na construção civil foi à elaboração da Norma de Desempenho ABNT NBR 15575, que entrou em vigor no ano de 2013. Esta norma, além de apresentar os requisitos dos níveis de desempenho para as edificações, também estabelece conceitos, como durabilidade e vida útil, que ainda não haviam sido bem esclarecidos por normas técnicas anteriores.

Segundo a ABNT NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 7) durabilidade é a capacidade da edificação ou de seus sistemas construtivos de exercer suas finalidades, ao longo do tempo, sob condições de utilização e manutenção especificadas. A norma brasileira de projetos de concreto armado ABNT NBR 6118 (2003) após sua última atualização, acrescentou a durabilidade como fator importante e indispensável a ser considerado no dimensionamento das estruturas de concreto armado. Estas estruturas devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conserve segurança e estabilidade em serviço durante o prazo correspondente à sua vida útil.

A durabilidade está relacionada às propriedades do material e à sua exposição ao longo do tempo, em um dado ambiente, sendo pontos de grande interferência na vida útil de uma edificação. Segundo a NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013, p. 10), a vida útil (VU) é o período de tempo durante o qual o sistema pode ser utilizado sob condições satisfatórias de segurança, saúde e higiene. A vida útil de

projeto (VUP) é o período estimado de tempo, em que um sistema é projetado para atender os requisitos de desempenho, desde que cumprido o programa de conservação previsto no manual de operação, uso e manutenção. O valor real de tempo de vida útil será uma composição do valor teórico de vida útil de projeto devidamente influenciado pelas ações da manutenção, da utilização, da natureza e da sua vizinhança. Segundo a norma de desempenho, a VUP mínima para estruturas de concreto deve ser igual ou superior a 50 anos, este tempo pode ser ou não atingido, em função do correto uso da edificação e da manutenção periódica e efetiva da estrutura e de seus componentes.

3.2 DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

O concreto armado foi considerado por muito tempo como um material com boa durabilidade e uma vida útil elevada, praticamente eterno. Esta concepção mudou, visto que com o passar do tempo começaram a serem observados diversos processos de deterioração comprometendo o desempenho das estruturas.

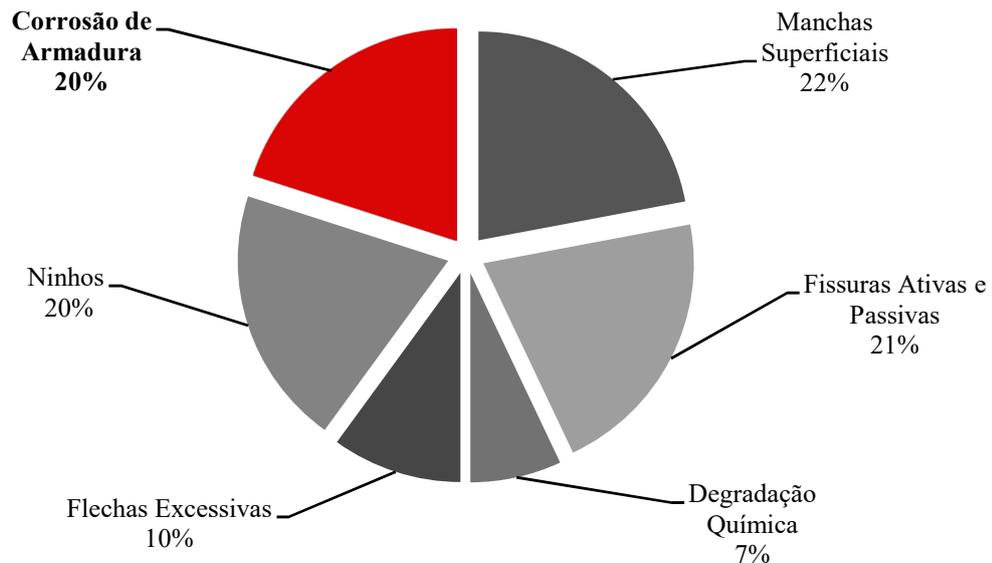
Segundo Andrade (2005), os consumidores da construção civil, públicos e privados, têm sofrido com a falta de durabilidade das estruturas de concreto armado. Graeff (2017) acrescenta que, deve-se a este motivo o fato de muitas obras existentes não se enquadrarem com as disposições normativas atuais quanto à tentativa de prolongar ou garantir a vida útil das edificações, pois seus projetos e execuções foram concebidos de acordo com as normas mais tradicionais, onde o objetivo principal era apenas garantir a adequada resistência mecânica requerida de projeto.

O termo “patologia” vem da medicina, e está relacionado com a ciência experimental que estuda as doenças do corpo humano. Na engenharia das construções, Souza e Ripper (1998) conceituam patologia das estruturas como o campo que se empenha a estudar e se ocupar das origens e formas de manifestações, analisando as consequências e mecanismos de ocorrências das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Devido ao envelhecimento natural da estrutura, é importante frisar que é inevitável que ocorra certo nível de deterioração que venha a afetar as propriedades dos materiais.

O conhecimento relacionado à Patologia das Construções vem avançando com o tempo, analisando as diversas origens que causam o sistema de deterioração das estruturas. Dentre as

manifestações patológicas em elementos de concreto armado, destaca-se a corrosão da armadura, por sua elevada ocorrência e potencial de dano. A Figura 3, adaptada de Helene (1988), percebe-se que é bem significativa a incidência da corrosão de armaduras juntamente as outras manifestações patológicas que deterioram as estruturas das construções.

Figura 3 – Distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas



(Fonte: adaptação Helene, 1988)

De acordo com Amleh e Mirza (1999), a corrosão do aço no concreto é um problema contínuo e multibilionário que afeta construções, transporte e outros tipos de infraestrutura. A corrosão de armaduras não se trata somente de uma questão séria de custos, como também implica, negativamente, na segurança estrutural.

3.3 MANUTENÇÃODAS ESTRUTURAS CIVIS

Para garantir a vida útil de uma edificação, é necessário que se desenvolvam atividades de manutenção preventivas e corretivas. Em ambas, o objetivo é prolongar a sua durabilidade, eliminando os problemas gerados pelos processos de deterioração, de maneira a manter ou recuperar as características da estrutura, garantindo o nível de desempenho e a segurança dos usuários.

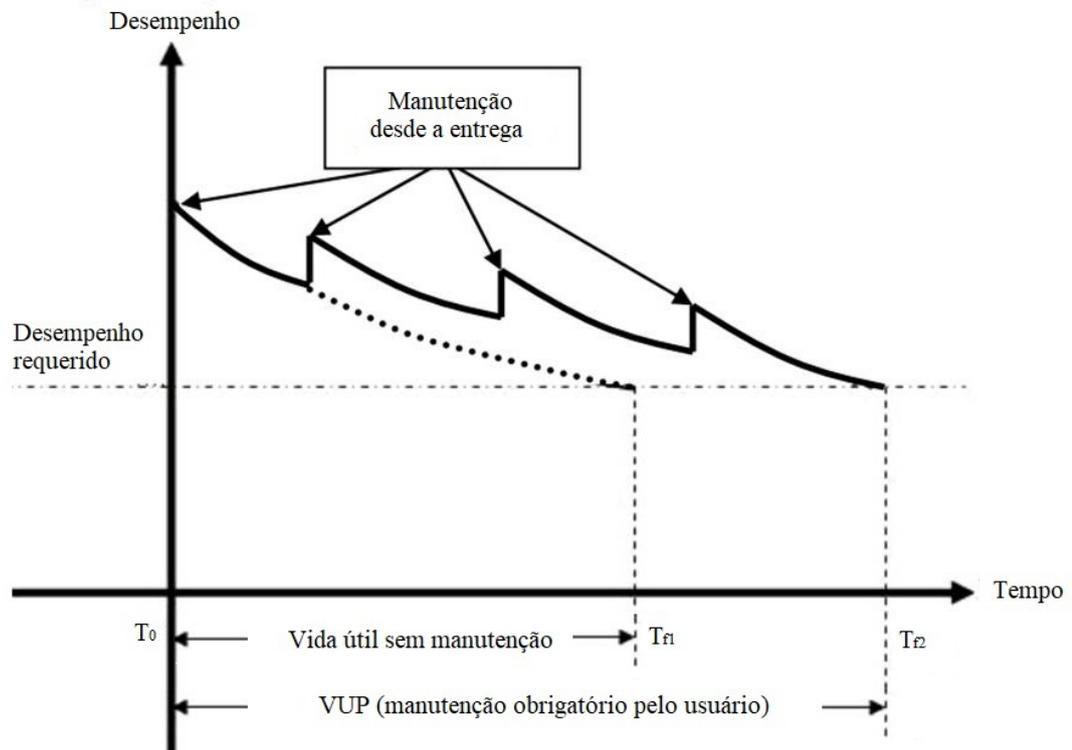
A manutenção de uma edificação é de suma importância para manter e assegurar que esta possa exercer suas funções requeridas, sem apresentar falhas. Segundo a NBR 5674 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, p. 2), manutenção é o conjunto de atividades a serem realizadas para recuperar e conservar a capacidade funcional da edificação e seus sistemas constituintes, a fim de atender a segurança e as funções requeridas dos seus usuários. A norma também classifica a manutenção de edifícios em três tipos:

- a) Manutenção rotineira, caracterizada por serviços de conservação e prevenção realizados diariamente criando condições adequadas para seu uso e evitando que a edificação atinja o seu patamar mínimo estipulado de desempenho.
- b) Manutenção planejada, caracterizada por serviços estabelecidos e organizados antecipadamente no manual do usuário, garantindo a durabilidade esperada dos componentes das edificações em uso.
- c) Manutenção não planejada, caracterizada por serviços que exigem intervenção imediata para garantir e possibilitar o uso da edificação. Também se enquadra neste item a manutenção emergência, que é realizada em situações de graves riscos ou prejuízos aos usuários.

Para garantir e atender a vida útil de projeto, os serviços de manutenção devem ser previamente projetados e programados segundo a ABNT NBR 5674 (2012), que dispõe sobre a gestão da manutenção de edifícios.

A Figura 4 mostra a relação entre desempenho e o tempo em vida de edifícios. A garantia da vida útil de projeto (VUP) está diretamente relacionada às ações de manutenção. É necessário salientar a importância da realização integral das ações de manutenção pelo usuário, sem o que se corre o risco de a VUP não ser atingida. Ou seja, as eventuais patologias resultantes podem ter origem no uso inadequado e não, necessariamente, em uma construção falha (ABNT NBR 15575-1, 2013).

Figura 4 – Influência da manutenção na curva de degradação no tempo



(Fonte: adaptação ABNT NBR 15575-1, 2013)

4 POTENCIAL DO ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC) PARA REPARO DE ESTRUTURAS

Este capítulo apresenta uma revisão sobre a origem dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. Ao longo do capítulo são apresentadas as principais propriedades deste tipo de material e as alternativas para tornar esse compósito mais sustentável (*greener*), além disso, é abordado o potencial do ECC para reparo de estruturas analisando as propriedades mecânicas e a durabilidade.

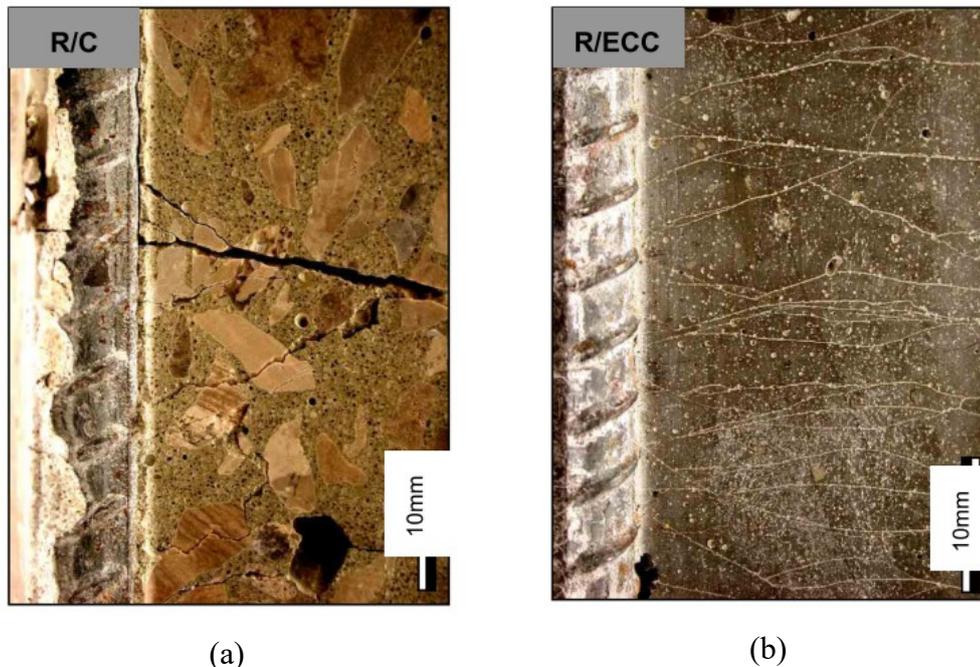
4.1 ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES (ECC)

Com o intuito de aumentar a resistência mecânica e o comportamento dúctil dos concretos, grupos de pesquisa começaram a estudar a possibilidade da adição de fibras em sua composição, surgindo assim, os compósitos cimentícios reforçados com fibras de alto desempenho (HPFRCC – High Performance Fiber Reinforced Cement Composites). O reforço com fibras adicionadas no concreto teve como objetivo principal proporcionar um aumento de ductibilidade e controlar o seu processo de fissuração quando em carregamento. Magalhães (2010, p. 1) afirma que as fibras aumentam a capacidade de absorção de energia e a resistência ao impacto, ocasionando assim uma diminuição no tamanho de abertura das fissuras e maior durabilidade do material.

Visando um compósito com comportamento dúctil utilizando teores mais baixos de fibras, alguns pesquisadores começaram a desenvolver técnicas de formulação e fabricação de concretos de alto desempenho reforçados com fibras. ACE-MRL (Advanced Civil Engineering - Materials Research Laboratory) é um grupo de pesquisas da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, liderado pelo Professor Victor Li, que vem desenvolvendo um novo tipo de compósito cimentício de alto desempenho denominado de Engineered Cementitious Composites (ECC). Enquanto a maioria dos HPFRCCs depende de um volume elevado de fibras para atingir um alto desempenho (até 5% em volume), o ECC utiliza quantidades tipicamente baixas de 2% em volume (LEPECH E LI, 2006).

Segundo Sahmaran e Li (2010), a principal característica que difere o ECC de um concreto convencional e concretos reforçados com fibras (FRC), é a capacidade de deformação sob tração uniaxial, que varia de 3% a 5%. 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 (LI, 2003). A Figura 5(a) apresenta o processo de fissuração no concreto convencional, uma fissura com uma grande abertura, já na Figura 5(b) várias pequenas fissuras com pequenas aberturas caracterizam o ECC.

Figura 5 – Comparativo do processo de fissuração entre um concreto convencional e um ECC

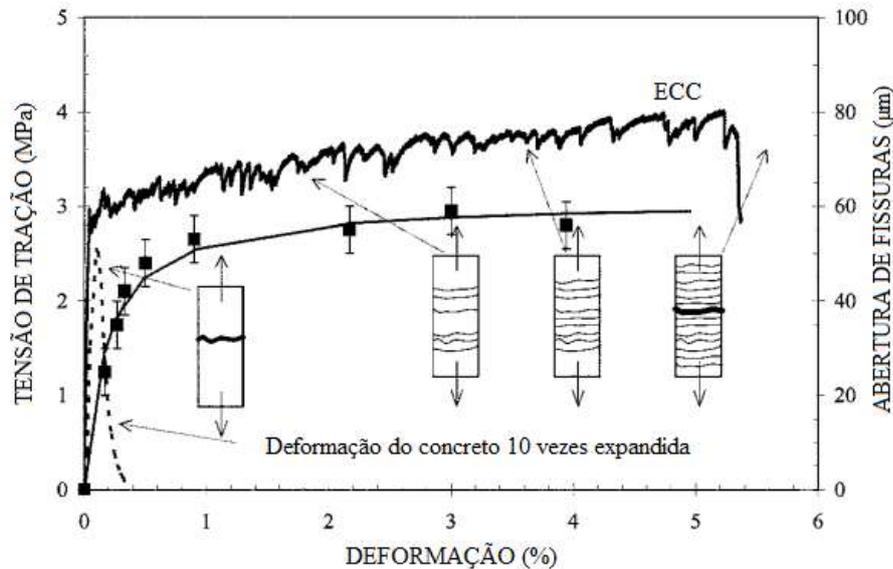


(Fonte: LI, 2003)

O ECC tem um teor de cimento consideravelmente alto, tipicamente duas a três vezes maior que o concreto convencional (QIAN E LI, 2007). O alto teor de cimento auxilia na dispersão das fibras e no controle da tenacidade da matriz. Este controle determina o comportamento strain hardening do compósito, fazendo com que o processo de múltipla fissuração possa ocorrer antes da ruptura ou arrancamento das fibras (MAGALHÃES, 2010, p. 15). A Figura 6 mostra uma curva típica tensão-deformação de tração de ECC e seu controle de largura de fissura estreita (WEIMANN E LI, 2003). A resposta na tração uniaxial exibe um

comportamento de enrijecimento acompanhado de múltipla fissuração, onde a resistência de pós-fissuração é maior ou igual à resistência de fissuração (MAGALHÃES, 2010, p. 10).

Figura 6 – Curva tensão-deformação à tração e abertura de fissuras características do ECC e de um concreto convencional



(Fonte: adaptação SAHMARAN E LI, 2009)

Qian e Li (2007) afirmam que este tipo de compósito atinge deflexões da ordem de 6 a 10 mm em ensaios de flexão a quatro pontos. Por esta característica, Garcez (2009) cita que entre as aplicações deste tipo de material, inclui-se a criação de elementos de elevada capacidade de absorção de energia, resistentes a sismos, a altas vibrações ou fadiga. Esta grande capacidade de deformação à flexão levou os mesmos a serem reconhecidos como Bendable Concretes.

As primeiras fibras utilizadas na composição do ECC foram as de PVA (Álcool Polivinílico), com capacidade de deformação de tração de 5% (LI, 2003). Por ter um alto custo de importação e déficit de quantidade para a aplicação em escala comercial, o uso da fibra de PVA se torna inviável no Brasil. Implementando esta pesquisa no País e adaptando com produtos locais, Garcez (2009) estudou a viabilidade de utilizar fibras de polipropileno, que possui características muito semelhantes à fibra de PVA e um menor custo. Os resultados encontrados demonstram a viabilidade do uso de fibras de polipropileno nos compósitos cimentícios de elevada deformação, o que se torna uma vantagem para difundir o uso deste compósito no Brasil. O Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), introduzindo esta pesquisa no Brasil e adaptando o ECC com materiais locais, criou um grupo de pesquisa com objetivo de difundir o estudo destes compósitos.

Outra característica interessante do ECC é o processo de self healing, que é a auto cicatrização das fissuras. Para que ocorra este processo, é necessário que os corpos de prova estejam em condições ambientais específicas, tenham, em sua composição, certos componentes reativos e que as fissuras apresentadas tenham pequenas aberturas. O concreto quando submetido a ciclos de molhagem e secagem e variações de umidade com presença de gás carbônico, promovem a hidratação de partículas expostas presentes nas fissuras (GARCEZ, 2009).

4.2 AVANÇOS PARA TORNAR O ECC MAIS SUSTENTÁVEL “GREENER ECC”

A sustentabilidade encontra-se cada vez mais presente nas decisões de projeto e manutenção da construção civil, demandando assim o desenvolvimento de novos materiais mais sustentáveis. A utilização de matérias-primas que produzem menos resíduos e demandam de menos energia para a sua produção vem ganhando grande destaque nos últimos anos. Iniciativas para tornar os ambientes construtivos mais sustentáveis (*grening*) estão sendo avaliadas e estudadas dentro do meio acadêmico, industrial e governamental.

Por possuir um teor de cimento, consideravelmente elevado, esta característica compromete o desempenho de sustentabilidade do ECC, já que a produção de cimento gera grandes emissões de CO² para o meio ambiente. Como forma de amenizar isto, atualmente, a cinza volante e escória de forno, resíduos gerados da indústria termoeletrica e da fabricação de ferro, já vêm sendo utilizados como elementos complementar ao cimento. Além de ser uma alternativa para o melhor aproveitamento destes resíduos e redução dos impactos ambientais, também proporcionam melhorias nas propriedades do concreto.

Outra alternativa que vem sendo bastante estudada nos últimos 20 anos como substituinte do cimento é a adição de Cinza de Casca de Arroz (CCA), resíduo agroindustrial proveniente da queima da casca de arroz como fonte de energia. A casca queimada produz uma elevada quantidade de cinzas, representando cerca de 20% da massa da casca de arroz (CONAB, 2014 apud RIGHI, 2015, p.41). Encontrado em larga escala no Rio Grande do Sul, a CCA apresenta na sua composição química, elevado teor sílica (90 a 95%), podendo ser utilizado na construção civil como pozolana em concretos e argamassas.

Pesquisas científicas envolvendo a casca de arroz e seu subproduto, já vêm sendo realizadas há muitos anos. Tiboni (2007), conforme apresentado por Righi (2015), retratou uma revisão histórica dos principais trabalhos que formam a estrutura cronológica do conhecimento a respeito da cinza de casca de arroz, expresso na Tabela 1.

Tabela 1 – Estrutura cronológica do conhecimento sobre CCA

Ano (s)	Local	Autor (es)	Trabalho (s)
1924	Alemanha	BEAGLE	Utilização de Casca de Arroz no Concreto.
1940 - 1950	-	DIVERSOS	Blocos confeccionados com cimento Portland e CCA.
1973	Bélgica	METHA	Primeira Patente no Assunto.
1976	-	PITT	Controle de combustão em leito fluidizado.
1978	Índia	MEHTA E PIRTZ	Substituição de cimento Portland por CCA em concreto em massa.
1979	Índia	PRAKASH	Utilização de CCA em trabalhos de alvenaria e fundações.
1979	Paquistão	-	Primeiro Workshop sobre o assunto.
1981	Ásia	COOK	Estudo da fluência e retração de concretos de cimento Portland com a adição de CCA.
1982	Japão	-	Produção e emprego de CCA como material cimentício.
1984	Israel	HANA YOUSIF	Efeito da queima e moagem nas propriedades de argamassa.
1986	Índia	JAMES E RAO	Morfologia e características químicas e físicas da CCA.
1989	Tailândia	HWANG E WU	Hidratação e microestrutura de pastas de cimento produzidas com diferentes CCAs.
1994	EUA	MEHTA	Patente relativa a produtos altamente duráveis com cinzas, com o emprego de 5 a 30% de CCA substituindo o cimento.
1995	Brasil	ISAIA	Efeito de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de alto desempenho.
1999	Brasil	GAVA	Estudo comparativo de diferentes metodologias para avaliação da atividade pozolânica.
2001	Espanha	PAYA	Determinação de sílica amorfa na CCA por um rápido método analítico.
2003	Brasil	PREDÊNCIO, SANTOS E DAFICO	Revisão sobre CCA, incluindo processos de queima e tratamentos realizados para a obtenção de sílica da casca de arroz.
2005	Brasil	ISAIA	Cinza de casca de arroz in: concreto, ensino, pesquisa e realizações.
2008	Brasil	MEHTA E MONTEIRO	Cinza de casca de arroz in: concreto, microestrutura, propriedades e materiais.

(Fonte: RIGHI, 2015 apud TIBONI, 2007)

É sabido que a queima sem controle da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica, normalmente na forma cristalina. Se submetida à queima controlada, a sílica pode ser amorfa, caracterizada por uma alta reatividade (CORDEIRO, 2009). Segundo Mehta (1992), a reatividade da sílica amorfa é diretamente proporcional à área superficial específica da cinza. Assim, uma diminuição da finura da cinza é realizada para que as mesmas possam ser incorporadas na matriz de cimento. No caso de cinzas residuais pouco reativas, como as utilizadas no presente trabalho, Mehta e Monteiro (2014) também sugerem que as mesmas sejam moídas até a obtenção de um pó fino que possa ter atividade pozolânica, isto é, capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de umidade para formar compostos que exibem propriedades cimentantes (PEREIRA DA COSTA, 2015).

No Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS, alguns estudos como Righi (2015) e Pereira da Costa (2015) já utilizaram a Cinza de Casca de Arroz como substituto do cimento em ECC, comprovando que este material possui potencial quando utilizado em substituição ao cimento. Righi (2015), em sua tese de mestrado, estudou o uso de cinzas no ECC com diferentes tempos de moagem (1, 2, 4, 6 e 8 horas) e porcentagens de substituição (10%, 20% e 30%). Como resultado, o compósito com 30% de cinza e tempo de moagem de 8 horas apresentou os melhores resultados no processo de múltipla fissuração e endurecimento sob deformação (*strain hardening*).

Diante disso, o presente trabalho visa contribuir para o avanço do estudo na área, desenvolvendo primeiramente uma análise da possibilidade da utilização de um novo teor de substituição de 50% de CCA (em volume de cimento) e tempo de moagem de 8 horas. Esta investigação se dará em termos de durabilidade e resistência mecânica do ECC com o novo teor de substituição, e objetiva tornar este material ainda mais sustentável e viável economicamente.

4.3 UTILIZAÇÃO DO ECC PARA REPARO DE ESTRUTURAS

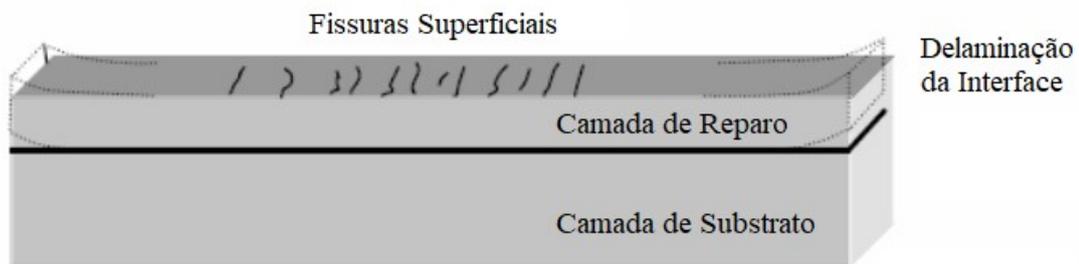
Um dos parâmetros mais importantes no reparo de estruturas é a compatibilização entre material de reparo e o substrato de concreto, já que trata-se de um dos fatores que garante a durabilidade da estrutura pós-manutenção. A compatibilidade é definida como um balanço de deformações e propriedades físicas, químicas e eletroquímicas entre o material de reparo e o concreto do substrato (VAYSBURD E EMMONS, 2006). Essa balança garante que o sistema

de reparo atue como uma estrutura monolítica resistindo a estresses induzidos sem deterioração prematura durante um período de tempo projetado.

Segundo Emmons e Vaysburd (1994), outro ponto crucial para a durabilidade dos reparos concretos é a resistência de união entre o material de reparo e o substrato de concreto. Quando um material cimentício é utilizado como reparo sob a superfície do concreto antigo, logo após a sua aplicação este começa a sofrer retração por secagem. No entanto, a deformação por contração do material de reparo é restringida pelo substrato de concreto, de modo que a tensão será desenvolvida na camada de reparo, e tanto a tração quanto a tensão de cisalhamento serão desenvolvidas ao longo da interface entre o reparo e o substrato de concreto (LI E LI, 2009). Portanto, uma resistência de união suficiente é necessária para suportar as tensões na interface do substrato de reparo e para garantir que não haja delaminação da interface.

A contração diferencial entre o material de reparo e o substrato de concreto é considerada a principal causa da falha dos reparos de concreto. Ente pode induzir altas tensões no sistema de reparo e resultar na fissuração do material e no descolamento da camada na área de interação com o substrato de concreto, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Fissuração do material de reparo e delaminação da interface devido à contração diferencial



(Fonte: adaptação LI E LI, 2006)

Entende-se que a aderência das argamassas de reparo é um requisito determinante do desempenho e da durabilidade de todo e qualquer reparo localizado. Moreno (2002) afirma que a aderência entre argamassa e concreto é, inicialmente, determinada pela reologia da argamassa no estado fresco e pela porosidade do substrato, que definem a intensidade do fenômeno da capilaridade.

Além dos materiais de reparo convencionais, o ECC tornou-se, recentemente, um material de reparo promissor devido às suas excelentes propriedades mecânicas e boa durabilidade (LI,

2004). Quando o ECC é usado como material de reparo, sua alta ductilidade e o comportamento de múltipla fissuração podem liberar as tensões induzidas pela contração diferencial. A contração diferencial, portanto, causa fissuras no ECC, em vez da delaminação da interface (LI E LI, 2009). Este fenômeno foi demonstrado tanto no laboratório (LI E LI, 2009) como em campo (LEPECH E LI, 2006).

Além disso, a pequena espessura de fissura na ECC pode reduzir significativamente a penetração de água, oxigênio, cloretos, álcalis ou sulfatos no sistema de reparo. Isso causa corrosão de reforço e deterioração do concreto. O ECC pode, portanto, melhorar a durabilidade de estruturas expostas a ambientes agressivos, como ciclos de congelamento e descongelamento, imersão em água quente, imersão em cloretos, exposição ao sal de degelo e reação de álcali-silicato (LI, 2007, SAHMARANE LI, 2008, SAHMARANET AL., 2008).

Pereira da Costa (2015), em sua tese de mestrado, estudou a análise da durabilidade e alguns processos de deterioração que podem afetar o ECC, voltados a estruturas de concreto armado. Esta pesquisa constatou que o ECC apresenta uma maior permeabilidade devido à presença de fibras nos compósitos, aumentando a quantidade total de poros e gerando um maior risco de difusão de cloretos em comparação aos concretos convencionais. Esta também estudou a possibilidade da substituição do cimento por cinza de casca de arroz, o que proporcionou um ganho considerável quanto à penetração e difusão de cloretos, melhorando a microestrutura do compósito no sentido de dificultar a passagem de agentes agressivos. Portanto, o uso de CCA na mistura do ECC, possibilita a utilização deste material como reparo e reforço, além da construção de novas estruturas.

5 REPARO DE ESTRUTURAS CORROÍDAS

Dentre os diversos processos de deterioração do concreto armado, a corrosão de armaduras merece atenção diferenciada, por se tratar de uma das manifestações patológicas mais comuns em obras civis e por sua severidade. A corrosão da armadura acelera a redução do desempenho das estruturas de concreto armado gerando efeitos deletérios. Neste capítulo, serão abordados os tipos de corrosão em estruturas de concreto armado, as principais propriedades estruturais afetadas pela corrosão da armadura e o procedimento de análise e recuperação destas estruturas degradadas.

5.1 TIPOS DE CORROSÃO E MODELAGEM DO PROCESSO CORROSIVO

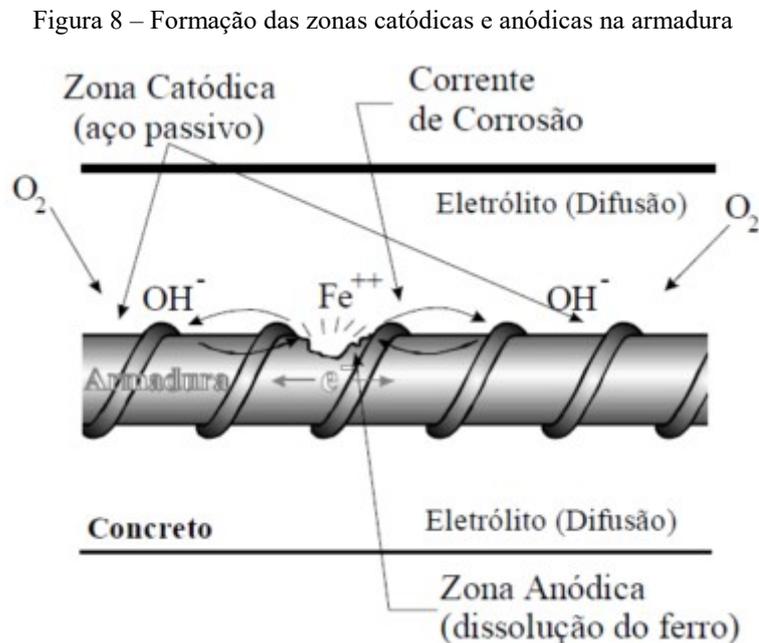
A corrosão pode ser entendida como a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, resultado de reações deletérias de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de degradação (HELENE, 1993).

De acordo com Gentil (2011, p. 39) basicamente são dois os processos corrosivos que podem ser desencadeados em armaduras de aço. As reações químicas e eletroquímicas se passam na superfície de separação entre metal e o meio corrosivo, obedecendo a princípios bem estabelecidos.

Na corrosão por reações químicas, também conhecida como corrosão seca ou oxidação direta, os átomos reagem diretamente com o oxigênio formando uma película delgada de produto de corrosão na superfície do metal. A película que se forma sobre a superfície da armadura é compacta, uniforme e pouco permeável, podendo servir até de proteção relativa das armaduras contra a corrosão úmida posterior, de natureza preponderantemente eletroquímica.

O outro processo é a corrosão eletroquímica ou aquosa, esta é efetivamente uma das principais causas de deterioração precoce nas estruturas de concreto armado, reduzindo, em muitos casos, a vida útil das construções envolvidas (HELENE, 1993). Neste processo, a manifestação da corrosão ocorre como resultado da formação de pilhas ou células de corrosão, com eletrólito e diferença de potenciais entre trechos da superfície. Devido a este

fenômeno, algumas regiões da armadura tornam-se anódicas, em que se dá a oxidação do metal, e outras partes catódicas, onde ocorrem as reações de redução de espécies eletroquímica ou íons do eletrólito. Este processo pode ser observado na Figura 8, adaptada de Cascudo (1997).



(Fonte: CASCUDO, 1997)

A despassivação da armadura ocorre quando algum agente agressivo alcança o interior do concreto e altera as condições de estabilidade do mesmo junto à armadura. Dentre os mecanismos que podem promover a despassivação da armadura, podem-se citar os íons sulfetos, íons cloretos, dióxido de carbono, nitritos, gás sulfídrico, cátion amônio, óxidos de enxofre, fuligem, entre outros (TORRES, 2006).

O período de propagação da corrosão inicia após a despassivação da armadura, quando esta se torna vulnerável. Para desencadear a propagação da corrosão são necessários que estejam presentes todos os elementos básicos para ocorrência do processo. Segundo Helene (1986), três fatores devem existir, sendo estes, eletrólise, diferença de potencial e oxigênio, podendo existir agentes agressivos.

A corrosão desencadeada por ataque de íons cloreto é uma das formas mais agressivas de deterioração das estruturas em concreto armado. Sua importância é particularmente grande no

Brasil, que apresenta um considerável número de cidades situadas na faixa litorânea, que podem estar submetidas à ação agressiva dos ambientes marinhos ricos em cloretos (CASCUDO, 1997).

Neste trabalho, a simulação da corrosão das vigas se dará pelo ensaio de Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM), onde os corpos de prova ficam parcialmente imersos em uma solução repleta de íons de cloretos que migram para as barras da armadura através da aplicação de estímulos elétricos.

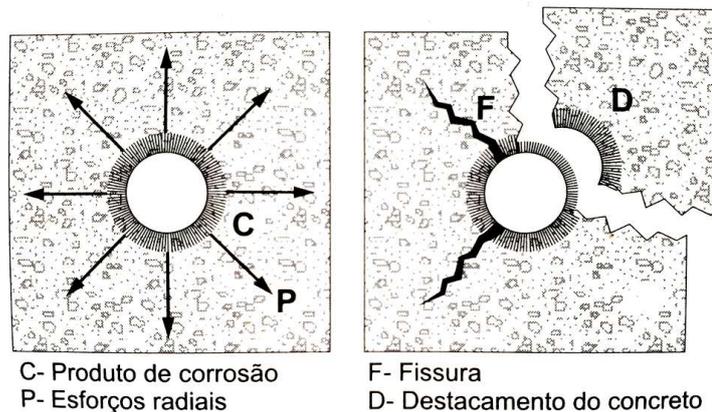
5.2 PRINCIPAIS PROPRIEDADES ESTRUTURAIS AFETADAS PELA CORROSÃO DA DE ARMADURAS

O processo corrosivo em estruturas de concreto armado provoca, inevitavelmente, a redução do desempenho estrutural das construções civis, que em muitos casos ocorre precocemente. O problema maior é que diversas propriedades estruturais podem ser afetadas de forma simultânea pela corrosão, acelerando o seu efeito deletério.

Segundo Graeff (2017), os sintomas da degradação das estruturas afetadas pela corrosão se manifestam sob a forma de perda de aderência entre o aço e concreto, diminuição da área da seção transversal das barras de armadura, surgimento de tensões radiais de tração no concreto, devido ao acúmulo dos produtos de corrosão junto às barras, deslocamento do concreto, em estágios avançados do dano, e modificação da capacidade de resistência à tração e ductilidade das barras de armadura.

De uma forma geral, à medida que os diversos tipos de corrosão vão se processando, os produtos decorrentes da corrosão eletroquímica do aço vão se acumulando cada vez mais ao redor das armaduras, criando verdadeiras “crostas” no seu entorno (CASCUDO, 1997). As reações corrosivas produzem compostos ferrosos cujo volume é muito maior que o material original, esta expansão da armadura produzirá esforços que geram tensões de tração no concreto. Estas tensões acabam gerando fissuras e deslocamento do concreto de cobertura, levando ao enfraquecimento da aderência e ancoragem entre o concreto e o aço, que pode ser observados na Figura 9. Por sua vez, estas fissuras podem favorecer a penetração de agentes agressivos, o que intensifica o problema e afeta diretamente a vida útil dos elementos de concreto armado (HELENE, 1986, p. 5).

Figura 9 – Esforços produzidos que levam à fissuração e destacamento do concreto



(Fonte: CASCUDO, 1997)

O comportamento da aderência entre barras de armadura com o concreto sofre grande influência negativa quando se estabelece um processo de corrosão intenso (CAETANO, 2008). Esse comportamento é influenciado pela bitola da barra e pelo grau de corrosão da mesma, sendo uma pequena redução no diâmetro da barra capaz de ocasionar uma grande redução da resistência de aderência.

Segundo Cascudo (1997), a redução do diâmetro ou seção das barras constitui-se no mais adequado parâmetro para a quantificação da deterioração. Pois, tanto a fissuração quando o aparecimento de manchas superficiais são fenômenos decorrentes da perda da massa da armadura devido à corrosão, havendo em ambos a redução da seção do aço.

5.3 ANÁLISE E RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS CORROÍDAS

O diagnóstico dos problemas patológicos é uma etapa crucial na recuperação de estruturas de concreto armado. Na fase de análise, sob o ponto de vista da durabilidade, uma avaliação sistemática visando à identificação e caracterização dos fenômenos patológicos pode ser atingida através de uma inspeção preliminar e uma inspeção detalhada.

Salvo raras exceções, os sistemas patológicos apresentam manifestações externas características que possibilitam o diagnóstico a partir da análise preliminar, sendo esta uma análise visual das lesões. Os sintomas de corrosão de armaduras em concreto armado são facilmente identificados e, normalmente, de fácil visualização, apresentando um quadro

sintomatológico típico. A identificação de manchas superficiais, fissuração e lascamento do concreto são bons indicativos do nível de deterioração de uma estrutura.

Na reabilitação das estruturas, é fundamental que a estratégia de intervenção a adotar seja baseada no conhecimento das causas e extensões da deterioração, assim determinar qual a solução técnica e economicamente mais adequada a cada situação. A recuperação de uma estrutura afetada por alguma manifestação patológica não é realizada de maneira rígida, ou seja, normalmente existem vários métodos ou sistemas de reparo para se utilizar, dependendo da gravidade e do tipo de manifestação. Cascudo (1997) estabelece níveis de deterioração segundo o Comité Eurointernacional do Betão (CEB), que estão apresentados na Tabela 2 em função de alguns parâmetros observados nos elementos estruturais sujeitos à corrosão das armaduras.

Tabela 2 – Níveis de deterioração de elementos de concreto armado sujeitos à corrosão de armadura

Indicação Visual	Níveis de Deterioração				
	A	B	C	D	E
Mudanças de cor	Manchas de ferrugem	Idem ao A	Idem ao A	Idem ao A	Idem ao A
Fissuração	Algumas longitudinais	Várias longitudinais; algumas nos estribos	Acentuado	Idem ao C	Idem ao C
Lascamento	-	Algum	Acentuado	Perda de contato aço/concreto em alguns trechos	Idem ao D
Perda de seção do aço	-	≅ 5%	≅ 10%	≅ 25%	Alguns estribos quebrados e barras principais flambadas
Flechas	-	-	-	Possíveis	Aparentes

(Fonte: adaptação CASCUDO, 1997)

A escolha do método ideal dependerá de alguns fatores como a possibilidade de acesso ao local de reparo, fatores econômicos e condicionantes técnicas, que variam de caso a caso. No caso de estruturas deterioradas por corrosão de armaduras, o quadro se torna um pouco mais complicada, à medida que o reparo deverá atuar em um ambiente que é, comprovadamente, agressivo (ANDRADE, 1992, p. 95).

Em estruturas debilitadas, as recuperações objetivam a devolução do seu estado original, restaurando sua segurança e aumentando sua durabilidade, com o intuito de prolongando a sua vida útil. Cabrera (1996) ressalta a importância de realizar pesquisas com o objetivo de munir engenheiros estruturais com ferramentas adequadas para o reparo e a manutenção das estruturas de concreto armado afetadas pela corrosão.

6 MÉTODO DE PESQUISA

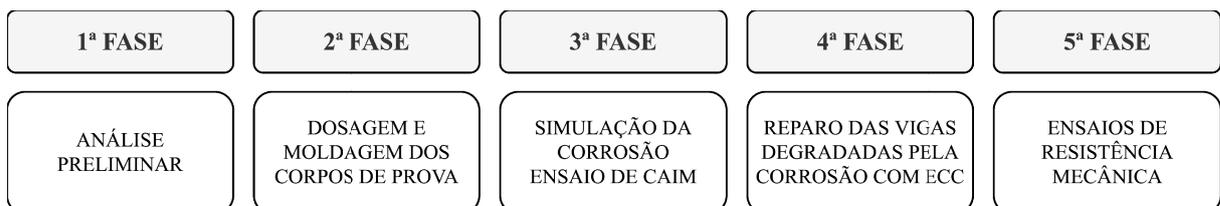
Este capítulo descreve as bases do programa experimental para que seja atingido o objetivo principal do trabalho: analisar a aplicação dos Engineered Cementitious Composites (ECC), como material de reparo em vigas de concreto armado quando submetidas ao processo de corrosão de armaduras.

O método é dividido em cinco fases. A primeira fase consiste na análise preliminar de caracterização e definição do traço do ECC. Será feita uma avaliação da possibilidade de utilizar um novo teor de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, analisando ensaios de resistência mecânica por flexão a quatro pontos e também a durabilidade por ensaio de migração de íons-cloretos. A partir destes resultados é definido o teor de substituição que será utilizado para a mistura.

Após a definição do traço do ECC é iniciada a segunda fase, em que será feita a dosagem e moldagem dos corpos de prova. A fase dois é destinada ao processo de simulação da corrosão pelo ensaio de CAIM. A quarta fase é constituída pelo reparo das vigas degradadas pela corrosão da armadura, utilizando como material de reparo compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com utilização de cinza de casca de arroz e fibra de polipropileno.

A quinta e última fase é destinada a realização dos ensaios de resistência mecânica a flexão das vigas de concreto armado e resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos. Para facilitar a visualização de como o programa experimental foi realizado, a Figura 10 mostra esquematicamente todas as fases do programa.

Figura 10 – Esquema do programa experimental



(Fonte: elaborado pelo autor)

A nomenclatura adotada para designação de cada modelo encontra-se na Tabela 3, juntamente com a quantidade de corpos-de-prova que foram confeccionados. Para melhor entendimento do processo de análise do reparo através do ensaio de resistência mecânica, segue uma breve explicação de cada tipo de viga analisada:

- c) Viga referência: moldada com concreto convencional.
- d) Viga degradada pela corrosão: moldada com concreto convencional e degradada pela corrosão através do ensaio de CAIM.
- e) Viga degradada pela corrosão e reparada com ECC: moldada com concreto convencional, degradada pela corrosão através do ensaio de CAIM e reparada com ECC.

Tabela 3 – Nomenclatura e quantidade das vigas

Denominação	Código	Quantidade
Viga referência	REF	2 unid
Viga degradada pela corrosão	COR	2 unid
Viga degradada pela corrosão e reparada com ECC	ECC	2 unid

(Fonte: elaborado pelo autor)

6.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados para confecção dos corpos de prova de concreto, bem como o compósito cimentício utilizados na pesquisa.

6.1.1 Agregado graúdo

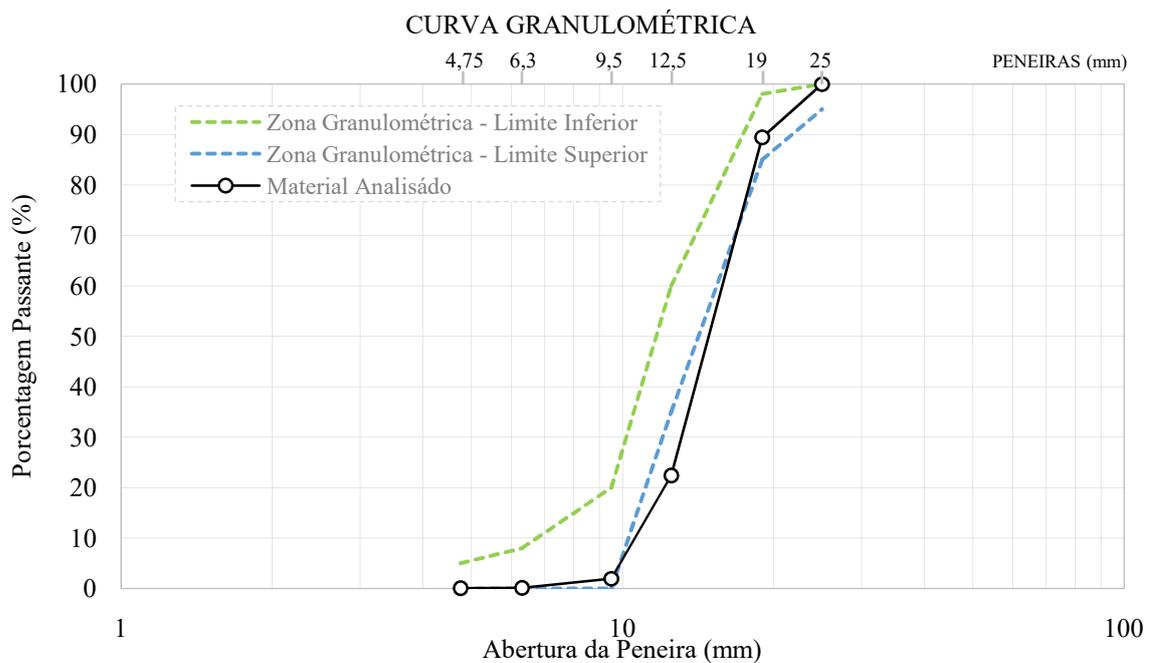
Nos concretos simples, foi utilizada, como agregado graúdo, uma rocha basáltica britada. As suas características físicas (de acordo com a NBR NM 53, 2009) e granulométricas (de acordo com a NBR NM 248, 2003) são mostradas na Tabela 4. A curva granulométrica é representada na Figura 11, em conjunto com os limites de zona estabelecidos pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 4 – Composição granulométrica da brita

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
25	0,00	0,00
19	10,59	10,59
12,5	67,01	77,61
9,5	20,40	98,01
6,3	1,88	99,88
4,75	0,06	99,94
Fundo	0,06	100,00
TOTAL	100,00	-
	Módulo de finura	7,08
	Dimensão máxima característica (mm)	25,00
	Massa específica (g/cm ³)	2,90

(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 11 – Curva granulométrica da brita



(Fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Agregado miúdo

6.1.2.1 Areia fina

Para confecção dos compósitos cimentícios, utilizou-se uma areia fina de origem natural, do tipo quartzosa. Suas características granulométricas (de acordo com a NBR NM 248, 2003) e massa específica (de acordo com a NBR NM 52, 2009) encontram-se na Tabela 5. A curva

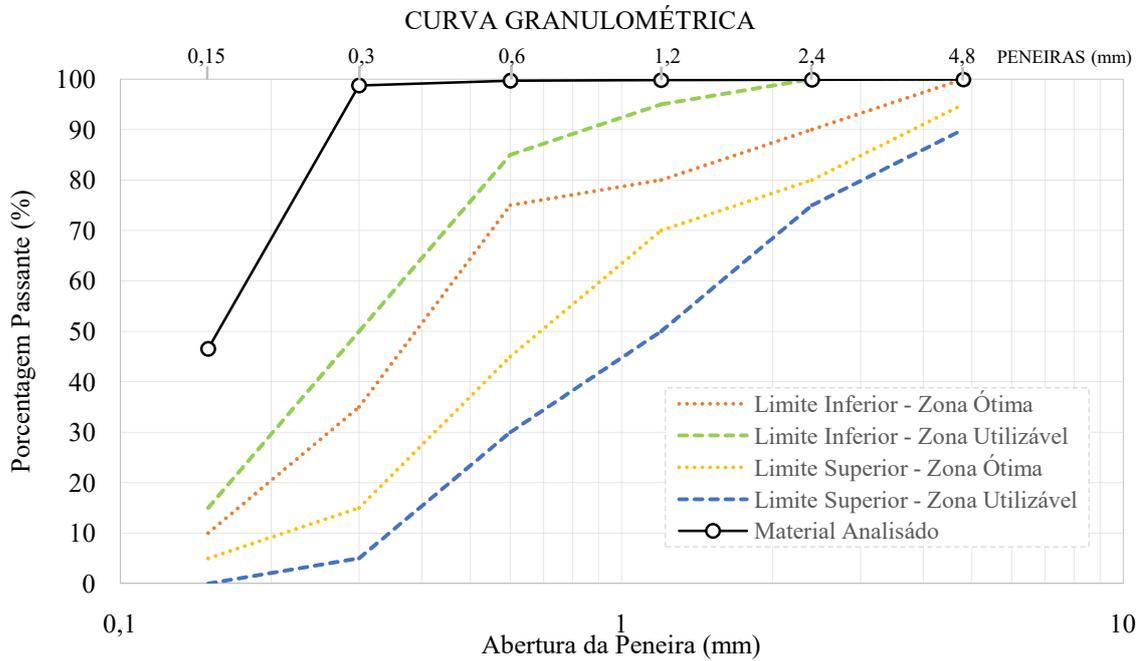
granulométrica pode ser visualizada na Figura 12, em conjunto com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidas pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 5 – Composição granulométrica da areia fina

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	0,05	0,05
2,4	0,13	0,18
1,2	0,05	0,23
0,6	0,15	0,38
0,3	0,97	1,35
0,15	52,17	53,52
Fundo	46,48	100,00
TOTAL	100,00	-
	Módulo de finura	0,56
	Dimensão máxima característica (mm)	0,30
	Massa específica (g/cm ³)	2,52

(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 12 – Curva granulométrica da areia fina



(Fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2.2 Areia média

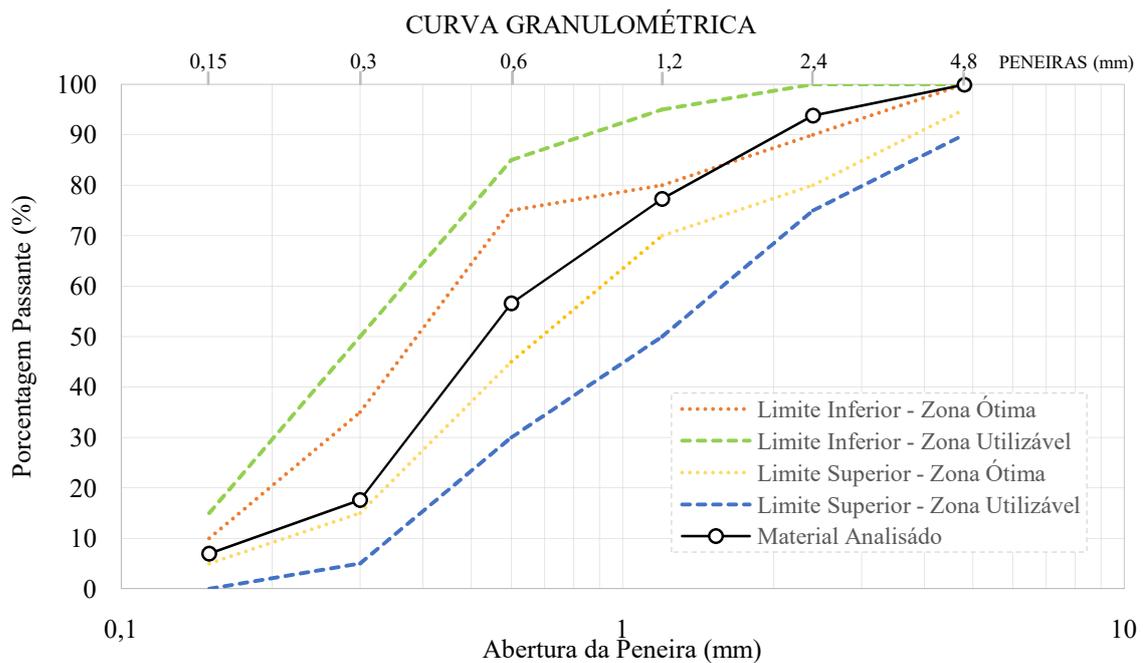
Na confecção do concreto simples, utilizou-se uma areia média, oriunda do Rio Jacuí da cidade de Porto Alegre/RS. A Tabela 6 descreve suas características granulométricas (de acordo com a NBR NM 248, 2003) e massa específica (de acordo com a NBR NM 52, 2009), seguida da sua curva granulométrica representada na Figura 13, com os limites de zonas estabelecidas pela NBR NM 248 (2003).

Tabela 6 – Composição granulométrica da areia média

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	0,05	0,05
2,4	6,22	6,27
1,2	16,51	22,78
0,6	20,70	43,47
0,3	38,95	82,42
0,15	10,63	93,05
Fundo	6,95	100,00
TOTAL	100,00	-
	Módulo de finura	2,48
	Dimensão máxima característica (mm)	4,80
	Massa específica (g/cm ³)	2,63

(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 13 – Curva granulométrica da areia média



(Fonte: elaborado pelo autor)

6.1.3 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho consiste em um cimento Portland de alta resistência inicial, classificado como CP V-ARI fabricado pela empresa Nacional. A alta resistência inicial é conseguida através da utilização de uma dosagem diferenciada de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Sua composição é formada por 95 a 100% de clínquer e gesso e 0 a 5% de calcário e cinza volante.

6.1.4 Cinza de Casca de Arroz

A cinza de casca de arroz (CCA) utilizada na confecção dos compósitos cimentícios, de cor predominantemente preta, é utilizada como combustível no processo de parboilização dos grãos de arroz de uma indústria localizada no estado do Rio Grande do Sul. A cinza resultante provém de um processo de queima não controlada.

Com a finalidade de aumentar a finura da cinza, e dessa forma, aumentar a sua atividade pozolânica, esta cinza teve sua granulometria reduzida através de um moinho de bolas¹. O processo de moagem foi realizado com um quilo de cinza por vez, por um tempo de 8 horas. Para melhor visualização do material, a Figura 14 (a), (b) e (c) apresentam respectivamente, a casca de arroz propriamente dita, a cinza de casca de arroz após a queima não controlada e a CCA após o processo de moagem.

Figura 14 – Casca de arroz e cinza sem controle de queima



(Fonte: foto do autor)

¹ 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.

A Tabela 7 apresenta as características físicas e químicas da cinza de casca de arroz utilizada neste trabalho após o processo de moagem. A NBR 12653 (ABNT, 2014): Materiais Pozolânicos estabelece as recomendações necessárias para um material se considerado pozolânico. A CCA utilizada neste trabalho está em conformidade com os requisitos mínimos exigidos pela norma em relação a composição química, que é de no mínimo 70% de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ e máximo de 4% de SO_3 . Esta norma limita a perda ao fogo em no máximo 10%, o que mostra que a cinza de casca de arroz não atende a este limite máximo exigido, isso se dá pelo fato de se tratar de uma CCA residual, sem controle de queima. Além disso, referente ao índice de atividade pozolânica, a CCA estudada encontra-se em conformidade com a norma, obtendo um valor superior a 90%.

Tabela 7 – Características químicas e físicas da cinza de casca de arroz (CCA)

Característica Física e Química			
Massa específica (g/cm^3)		2,06	
Perda ao fogo (%)		13,99	
Índice de atividade pozolânica (%)		162,48	
Composição Química			
SiO_3 (%)	82,21	MnO (%)	0,34
K_2O (%)	1,85	Al_2O_3 (%)	0,10
CaO (%)	0,75	SO_3 (%)	0,19
Fe_2O_3 (%)	0,48	CO_2 (%)	12,96
P_2O_5 (%)	0,65		

(Fonte: RIGHI, 2015)

6.1.5 Armaduras

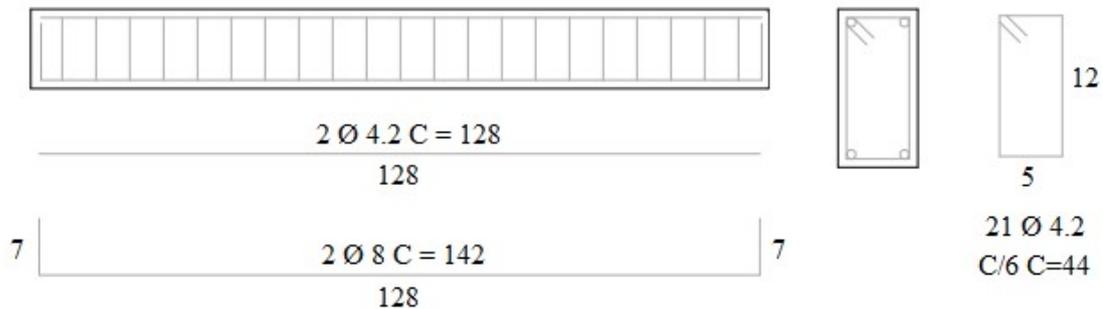
Para a execução das armaduras foram utilizadas barras de aço CA-50 e CA-60 produzidas pela empresa ArcelorMittal. O comprimento e diâmetro das barras longitudinais, de amarração e estribos estão descritos na Tabela 8. Os estribos foram amarrados nas armaduras longitudinais a cada 6 cm, utilizando arame queimado número 18. É possível observar o detalhamento da armadura na Figura 15.

Tabela 8 – Comprimento e diâmetro das barras de armadura utilizadas nos experimentos

	Aço	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)
Longitudinal	CA-50	1420	8
Amarração	CA-60	1280	4,2
Estribos	CA-60	44	4,2

(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Detalhamento da armadura



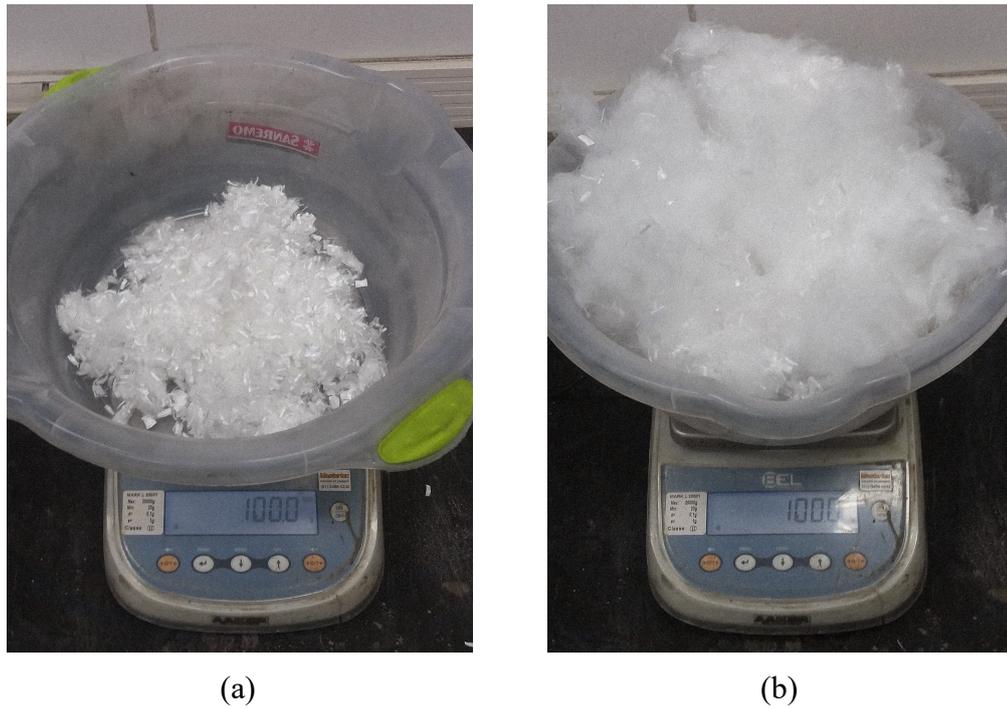
(Fonte: elaborado pelo autor)

6.1.6 Fibra de Polipropileno

Como substituição às fibras de PVA utilizadas na concepção do ECC, optou-se por utilizar neste trabalho fibras de polipropileno. Esta escolha se deu, pois a fibra de PVA é um material importado com um alto custo de importação, ao contrário da fibra de polipropileno que pode ser encontrada no Brasil e por um menor custo. Além disso, a fibra de polipropileno apresenta características muito semelhantes à fibra de PVA, não comprometendo o desempenho do compósito.

As fibras utilizadas, neste trabalho, são do tipo monofilamento e possuem 10 mm de comprimento, produzidas pela empresa Brasilit Saint-Gobain. Visando aprimorar a distribuição das fibras de polipropileno pelo corpo de prova, aplicou-se um método de dispersão do material. O procedimento consiste na armazenagem de 100g de fibra em um recipiente fechado, no qual injeta ar comprimido por um período de 10 segundos obtendo-se assim uma melhor dispersão das fibras. A Figura 16 (a) apresenta 100g de fibra de polipropileno, já na Figura 16 (b) a mesma quantidade de fibra após o processo de dispersão. A Tabela 9 apresenta suas propriedades físicas e mecânicas.

Figura 16 – Dispersão da Fibra de Polipropileno



(Fonte: fotos do autor)

Tabela 9 – 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 a Álcalis	Excelente

(Fonte: GARCEZ, 2009)

6.1.7 Aditivo

Para a confecção da mistura do compósito cimentício, foi utilizado um aditivo superplastificante para concreto de base policarboxílica, de terceira geração, comercializado pela Grace e denominado Tec-flow 8000. A utilização deste aditivo teve como objetivo melhorar a trabalhabilidade das misturas e facilitar a dispersão das fibras, sem ter que se elevar a relação água/cimento.

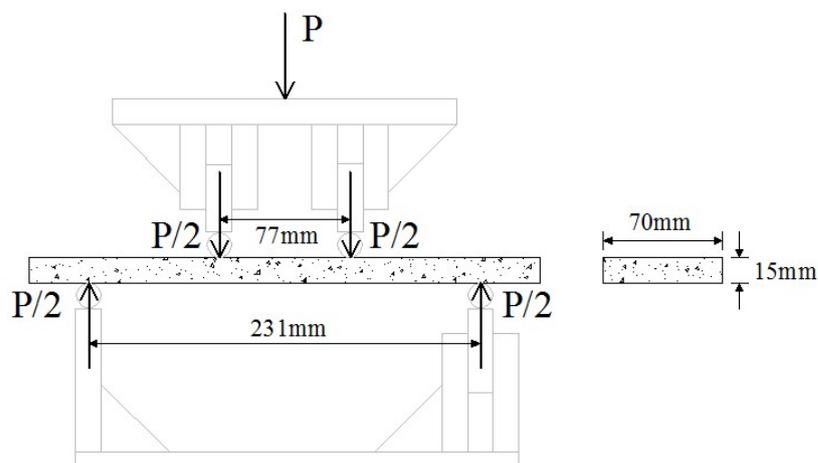
6.2 ENSAIOS PRELIMINARES

Para definição do traço do ECC que seria utilizado, foram feitos ensaios de caracterização dos compósitos cimentícios com 50% de substituição de cinza de casca de arroz por cimento (em volume) tendo como comparativo dados dos trabalhos de mestrado de RIGHI (2015) e PEREIRA DA COSTA (2015), além de ensaios feitos no período em que a autora do presente trabalho esteve como bolsista voluntária de iniciação científica no LEME.

6.2.1 Flexão a Quatro Pontos

Baseado em Magalhães (2010), e desenvolvido por Perrone et al. em 2012², em sua dissertação de mestrado, ainda não publicada, o ensaio tem como base a Norma ASTM C1609 (2012): Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete, realizados em quatro pontos do corpo de prova. 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 17 mostra um croqui da configuração do ensaio.

Figura 17 - Croqui do ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos



(Fonte: elaborado pelo autor)

O ensaio foi avaliado através dos deslocamentos ocorridos em função da carga aplicada. O deslocamento medido foi o do próprio equipamento: uma prensa com capacidade para 50 kN

²Dissertação não publicada com título “Estudo da utilização de lajes de continuidade de SHCC para substituição de juntas de dilatação tradicionais em pontes” do autor Vitor Cury Perrone, Orientador Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

e uma velocidade de carga de 1,2 mm/min. Para registrar as deflexões, foram instalados sensores LVDT (Linear Voltage Differential Transducer) para medir deslocamento do corpo de prova, um posicionado no meio do vão na vertical e outro na horizontal. Na Figura 18 é possível ver o detalhe do LVDT instalado para registrar os deslocamentos e o corpo de prova pronto para iniciar o ensaio.

Figura 18 – Configuração dos equipamentos para realizar os ensaios de resistência à tração na flexão em vigas quatro pontos



(Fonte: foto do autor)

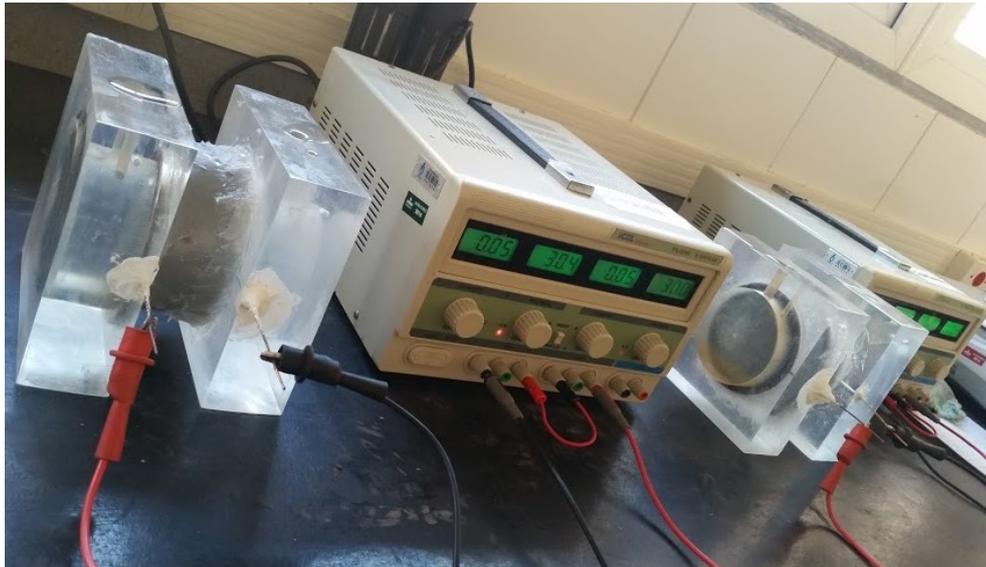
6.2.2 Migração Íons Cloretos

O ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, proposto pela Norma ASTM C1202 (2012): Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, consiste em medir a carga elétrica passante em uma amostra de concreto de dimensões 9,5 x 5,1 cm (diâmetro x altura), submetida a uma tensão de $60 \pm 0,1$ V durante um período de 6 horas. A amostra cilíndrica é acoplada a meias-células de acrílico, no qual suas 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 (normalidade esperada da solução). Entre as meias-células é gerada uma corrente elétrica que induz o ânion cloreto a se difundir através do concreto sob a ação de um campo elétrico.

Para obtenção da amostra de ensaio, após completar 28 dias de cura, os corpos de prova de 10 x 20 cm foram 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 selantes de poliuretano na face curva do corpo de

prova e após secagem, imersão dos mesmos em água por um período de 24 horas, visando à saturação dos poros. Após esta etapa, as amostras foram secas superficialmente e acopladas às células para realização do ensaio, utilizando silicone como vedação. O ensaio pode ser observado na Figura 19. Durante o ensaio, a temperatura foi mantida constante em 23°C.

Figura 19 – Execução do ensaio de penetração de íons cloretos



(Fonte: foto do autor)

6.2.3 Absorção e Índice de Vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005): Argamassas e concreto endurecidos –Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Para tanto, foram moldados três corpos de prova de 50 x 100 mm, mantidos em cura em câmara úmida e ensaiados aos 28 dias. O ensaio consiste na secagem das amostras e determinação da sua massa na condição seca. Após esta primeira etapa, os corpos de prova são saturados e, então, medidas suas massas na condição saturada e imersa em água. A absorção de água consiste na razão entre as diferenças de massa (saturada e seca) pela massa seca do corpo de prova. O índice de vazios pode ser obtido através da razão entre as diferenças de massas saturada e seca, pela diferença de massas saturada e imersa. Por fim, calculam-se as massas específicas da amostra seca, saturada e real.

6.3 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

Uma vez definidos os materiais utilizados, iniciou-se o programa experimental. Este capítulo descreve a preparação dos corpos de prova que foram ensaiados, através escolha do traço do concreto convencional utilizado, configuração das armaduras, e a concretagem e moldagem dos corpos de prova.

6.3.1 Traço do concreto convencional

A definição do traço do concreto levou em consideração a resistência à compressão do concreto, visando às edificações em geral, onde as resistências de 20 e 30 MPa são bastante utilizadas. Sendo assim, optou-se por trabalhar com um concreto de 30 MPa de resistência média à compressão. O traço utilizado foi baseado nos estudos realizados por Graeff (2007). A Tabela 10 mostra o traço escolhido.

Tabela 10 – Traço concreto convencional

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Relação a/c
30 MPa	1	2,9	3,6	0,66

(Fonte: elaborado pelo autor)

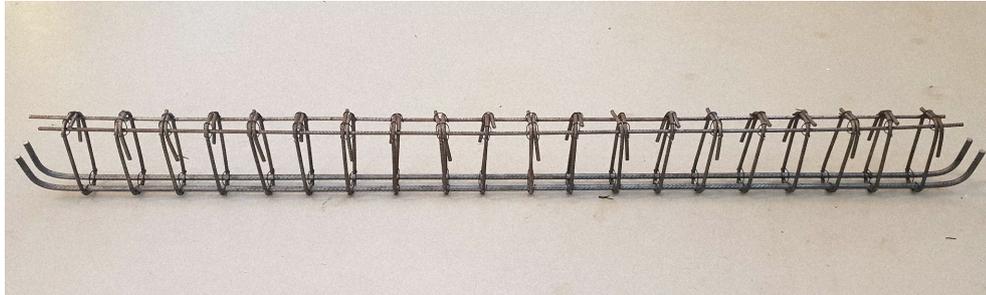
Após o traço definido, foi calculado o volume de concreto e a quantidade de material necessária para moldar 7 vigas de dimensão 7 x 14 x 130 cm e 9 corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 de diâmetro. Optou-se por confeccionar uma viga extra para ser submetida ao ensaio de corrosão acelerada, por se tratar de um ensaio que depende de muitas variáveis e podendo estar suscetível a apresentar variabilidade e falhas.

6.3.2 Montagem das armaduras

Antes de iniciar a concretagem, foram preparadas as armaduras para as vigas, que pode ser visualizada na Figura 20. Uma vez terminada fixadas todas as barras, foram preparadas as armaduras das vigas que seriam submetidas à corrosão. Para garantir a diferença de potencial elétrico necessária para realização do ensaio de CAIM, foram posicionados os fios de cobre em cima das barras da armadura positiva de aço CA-50, de 8 mm de diâmetro. Tomou-se cuidado de evitar o contato entre o fio de cobre, de espessura 2,5 mm, e as barras. Para a visualização mais detalhada do posicionamento do fio, as Figuras 21 (a) e (c) mostram o

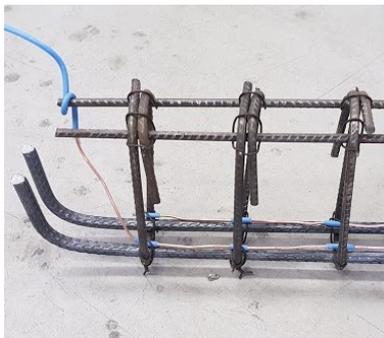
detalhe das duas extremidades da armadura e a Figura 21 (b) detalhamento da parte central da armadura.

Figura 20–Configuração da armadura



(Fonte: foto do autor)

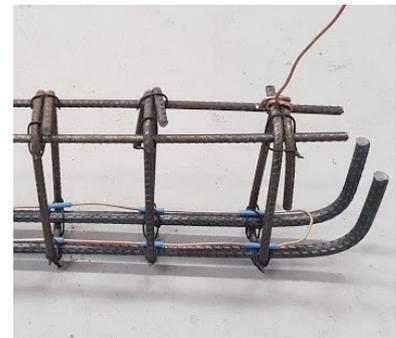
Figura 21 – Detalhe do fio da armadura com o fio de cobre amarrado



(a)



(b)



(c)

(Fonte: fotos do autor)

Como pode ser visualizado no detalhe da Figura 20 (c), foi fixado um fio de cobre na extremidade da armadura em contato com o aço para após a concretagem poder conferir se a armadura não estaria em curto, o que poderia gerar um ruído experimental no ensaio de corrosão acelerada das vigas.

6.3.3 Concretagem e moldagem dos corpos de prova

Concluída a montagem das armaduras, foi feita a pesagem dos materiais de acordo com a quantidade calculada pelo volume de concreto, como mostra a Figura 22. As formas, feitas de chapas de compensado plastificado, foram preparadas com desmoldante e os espaçadores de 1,5 x 1 x 7 cm de dimensão, feitos de cimento e areia, foram posicionados dentro das mesmas. A Figura 23 mostra as formas com os espaçadores e armaduras já posicionadas.

Figura 22 – Separação do material utilizado na concretagem



(Fonte: fotos do autor)

Figura 23 – Armaduras posicionadas e prontas para concretagem



(Fonte: fotos do autor)

O concreto empregado na moldagem dos corpos-de-prova foi preparado em laboratório, com auxílio de uma betoneira de 120 litros. Os materiais foram misturados na seguinte sequência: água, brita, cimento, areia e, por fim, o restante da água. O tempo de mistura foi baseado em inspeção visual, isto é, até que a mistura estivesse consistente e homogênea. Após o término da concretagem, foi feita a medição da consistência do concreto através do ensaio de abatimento de tronco de cone (comumente referido como *slump test*) - conforme a NBR NM

67 (ABNT, 1998). A Figura 24 apresenta o ensaio sendo realizado e os materiais utilizados para o mesmo. O valor de abatimento para o concreto convencional foi de 90 mm.

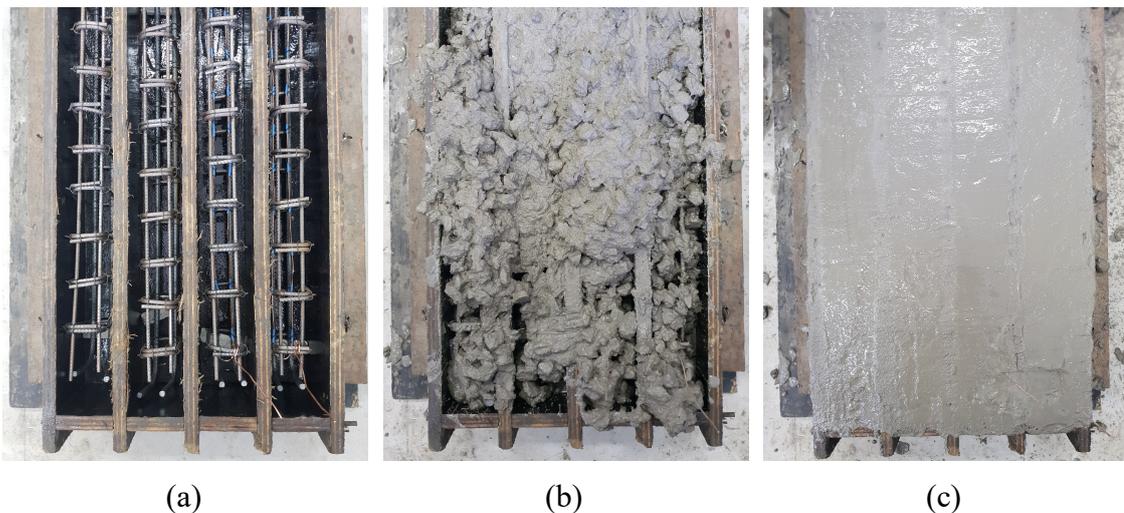
Figura 24 - Ensaio de abatimento de tronco cone



(Fonte: fotos do autor)

Após a medição da consistência do concreto, foi efetuada a moldagem dos corpos-de-prova, com cuidado para que os fios de cobre não saíssem do lugar e não houvesse o deslocamento das barras. As Figuras 25 (a), (b) e (c) apresentam as fases de concretagem das vigas, que compreendem o posicionamento da armadura nas formas, colocação do concreto, e adensamento e desempenho da superfície, respectivamente.

Figura 25 – Fases da concretagem das vigas de concreto armado



(Fonte: fotos do autor)

As vigas foram adensadas com vibrador de imersão e os corpos-de-prova cilíndricos vibrados na mesa vibratória. Os corpos-de-prova foram desmoldados após 1 dia, e curados em câmara úmida, à temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar superior a 95%, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003): Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

6.4 CORROSÃO ACELERADA

Considerando o conhecimento já adquirido pelo laboratório em trabalhos e experimentos anteriores, optou-se pelo método CAIM para desencadear o processo corrosivo pela indução eletroquímica. Segundo Graeff (2007), todo ensaio acelerado distorce as condições de agressividade, fazendo com que a correlação entre as condições de ensaio e as condições naturais seja mais difícil, e praticamente, impossibilita a estimativa de vida útil a partir da análise de tempos de ensaio. Apesar disso, considerando as limitações de tempo para realização dos ensaios, a corrosão acelerada é uma ferramenta útil para análises comparativas.

O ensaio de CAIM propõe a imersão parcial do corpo de prova em uma solução de íons de cloretos. Esses íons de cloreto acabam migrando da solução para as barras da armadura através da aplicação de estímulos elétricos e iniciam o processo corrosivo. Para execução deste método, torna-se necessária a definição de alguns parâmetros iniciais. Com o intuito de realizar um maior controle sobre a corrosão, determinou-se que seria mantida a mesma taxa de corrente constante utilizada nos ensaios de Graeff (2007).

A densidade de corrente escolhida para essa pesquisa foi de $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Para o cálculo da corrente constante que deve ser aplicada no sistema levou-se em conta que as barras longitudinais a serem corroídas são de 8 mm de diâmetro e 127 cm de comprimento, obtém-se assim a corrente de 320 mA. Outro parâmetro definido foi a concentração de NaCl na solução, foram misturados 35g de NaCl por litro d'água, formando assim uma solução de cloretos parcialmente similar à concentração encontrada no Oceano Atlântico.

Definidos esses parâmetros, foi possível iniciar os ensaios. Os equipamentos empregados para aplicar o nível desejado de densidade de corrente foram três fontes de alimentação ICEL, modelo PS-5000. Cada uma delas apresentava duas saídas, capazes de fornecer corrente ou tensão constante, nas faixas de 0 a 3A, para a corrente, e 0 a 30 V para a tensão.

Para a imersão da face inferior das vigas na solução de cloretos, foram montadas cinco piscinas, uma para cada viga. Utilizaram-se espaçadores de madeira para evitar o contato da viga com o plástico para garantir que a face inferior da viga ficasse totalmente exposta à solução. A altura de solução na piscina corresponde à espessura do comprimento do concreto mais a espessura do espaçador de madeira, buscando gerar condições para o fácil acesso tanto da umidade quanto do oxigênio. A Figura 26 mostra a configuração geral do ensaio.

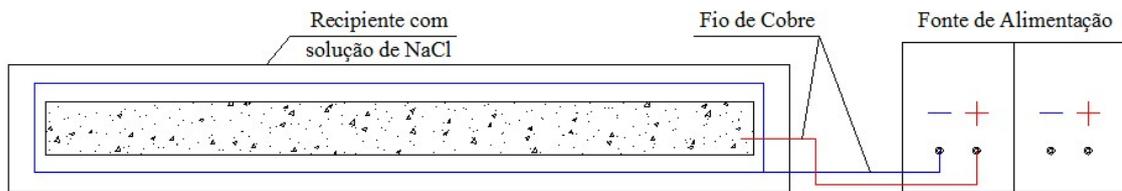
Figura 26 – Configuração geral do ensaio de corrosão



(Fonte: foto do autor)

O fio de cobre, detalhado no capítulo 6.3.2, que posicionado logo acima da armadura positiva e que foi concretado junto com a mesma, foi conectado ao pólo positivo da fonte, com o intuito de atuar como ânodo no processo eletroquímico. Outro fio de cobre foi imerso na solução e posicionado no entorno da viga, este foi ligado ao pólo negativo da fonte desempenhando o papel de cátodo. A ligação com as fontes de alimentação pode ser mais bem visualizada na Figura 27.

Figura 27 – Esquema de ligação dos corpos-de-prova com a fonte de alimentação (vista superior)



(Fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente, as vigas foram ligadas em série, com uma corrente contínua de 320 mA, permitindo com que a diferença de potencial variasse de acordo com a resistência das vigas. As Figuras 28 e 29 mostram respectivamente as fontes calibradas para execução do ensaio e o detalhe das ligações das fontes com o fio de cobre.

Figura 28 – Fontes calibradas com 320 mA de corrente contínua



(Fonte: foto do autor)

Figura 29 – Detalhe das ligações das vigas



(Fonte: foto do autor)

Para controle do ensaio, as vigas foram monitoradas duas vezes ao dia. Era feita a conferência da calibração das fontes, garantindo que todas mantivessem a corrente contínua de 320 mA. A altura da solução das piscinas também era controlada, a conferência foi feita com um gabarito de acrílico, onde este era posicionado na parte superior da viga e marcava a altura do cobrimento de 15mm, como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Gabarito em acrílico para verificar o nível da solução



(Fonte: foto do autor)

O tempo de duração do ensaio de corrosão foi baseado nos estudos realizados por Graeff (2007), ficando determinado que o tempo necessário para atingir 5% de perda de massa seria de aproximadamente 15 dias. No entanto, devido à limitação de tempo, as vigas ficaram 14 dias submetidas ao ensaio. As Figuras 31 e 32 mostram as vigas corroídas no final do ensaio.

Figura 31 – Face inferior das vigas após o ensaio de CAIM



(Fonte: foto do autor)

Figura 32 – Face inferior das vigas após a limpeza do produto da corrosão



(Fonte: foto do autor)

6.5 REPARO DAS VIGAS ATACADAS PELA CORROSÃO

6.5.1 Traço do ECC

O traço referência utilizado para os compósitos cimentícios foi desenvolvido ao longo dos anos no Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME/UFRGS). Ressalta-se que, diferentemente dos concretos convencionais, os compósitos cimentícios de elevada deformação são compostos apenas por cimento, areia, fibras e aditivo. Neste trabalho, para tornar o ECC mais sustentável, foram feitos ensaios e análises preliminares e optou-se por substituir parte do cimento por cinza de casca de arroz, em 50% do seu volume. O traço utilizado pode ser visualizado na Tabela 11, onde todos os materiais foram calculados em relação a quantidade de cimento.

Tabela 11 – Traço ECC com 50% de CCA

	Cimento	CCA	Areia Fina	Água	Aditivo	Fibra PP
ECC Referência	1	0,66	1,5	0,69	0,014	0,035

(Fonte: elaborado pelo autor)

Após o traço definido, foi calculado o volume e a quantidade de material necessária para fazer o reparo de duas das vigas que foram atacadas pela corrosão. Além disso, foi calculado também o material para concretagem de 6 corpos de prova cilíndricos de 10cm de altura e 5cm de diâmetro e 3 corpos de prova cilíndricos de 20cm de altura e 10cm de diâmetro preenchidos pela metade para o ensaio de aderência entre o concreto convencional e o ECC (apresentado no item 6.6.3).

6.5.2 Preparação das Vigas

Para execução do reparo, foi feita a exposição completa das barras através da remoção do concreto envolvente. Para execução desta etapa a face inferior da viga foi colocada para cima e o concreto foi retirado com o auxílio de uma talhadeira e de uma marreta. A Figura 33 apresenta a viga de concreto armado com a armadura para cima após a remoção do concreto de toda seção inferior. Os apoios laterais das vigas foram conservados para execução do ensaio de flexão a quatro pontos (descrito no item 6.6.1).

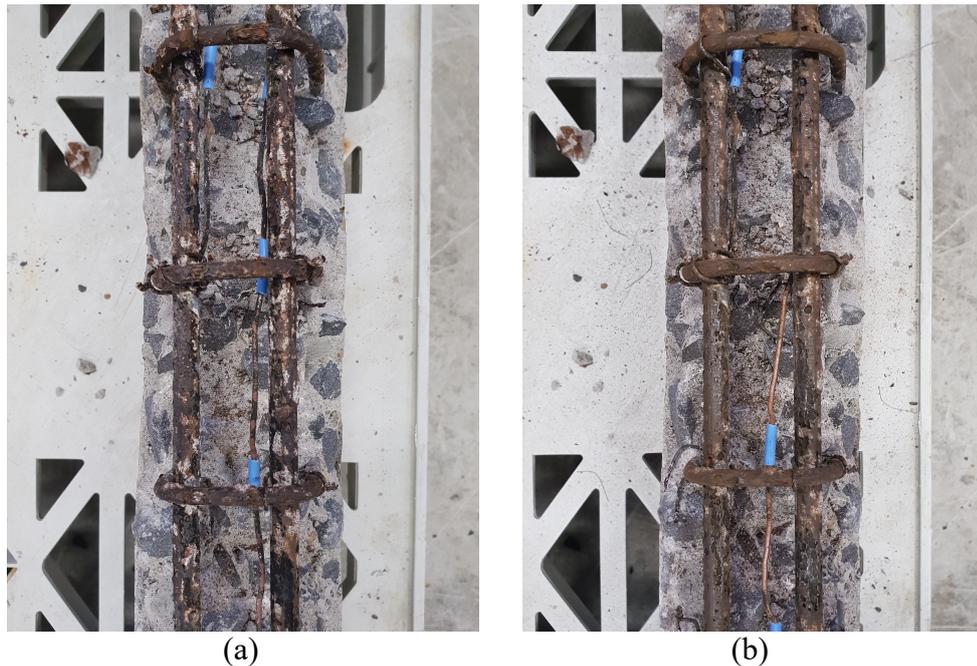
Figura 33 – Viga após a remoção do concreto para execução do reparo



(Fonte: foto do autor)

As barras passaram por um processo de limpeza com o auxílio de uma escova de aço, esta operação tem por objetivo remover a camada de óxido do contorno da barra. A Figura 34 (a) e (b) apresentam a armadura antes e após o processo de limpeza. Optou-se por não utilizar nenhum produto anticorrosivo nas barras, já que não seria avaliada a durabilidade destas estruturas. Após a limpeza das barras foi feita a conferência do diâmetro das barras longitudinais com o auxílio de um paquímetro para uma análise prévia da diminuição da massa das barras após o ensaio de aceleração da corrosão.

Figura 34 – Limpeza da armadura antes do reparo



(Fonte: foto do autor)

6.5.3 Concretagem do ECC e processo de reparo

Para execução do reparo nas vigas, foram utilizadas 3 chapas de compensado plastificadas preparadas com desmoldante e fixadas nas laterais das vigas com o auxílio de grampos do tipo sargento. A Figura 35 mostra a fixação das chapas nas laterais da viga.

Figura 35 – Fixação das chapas nas laterais das vigas

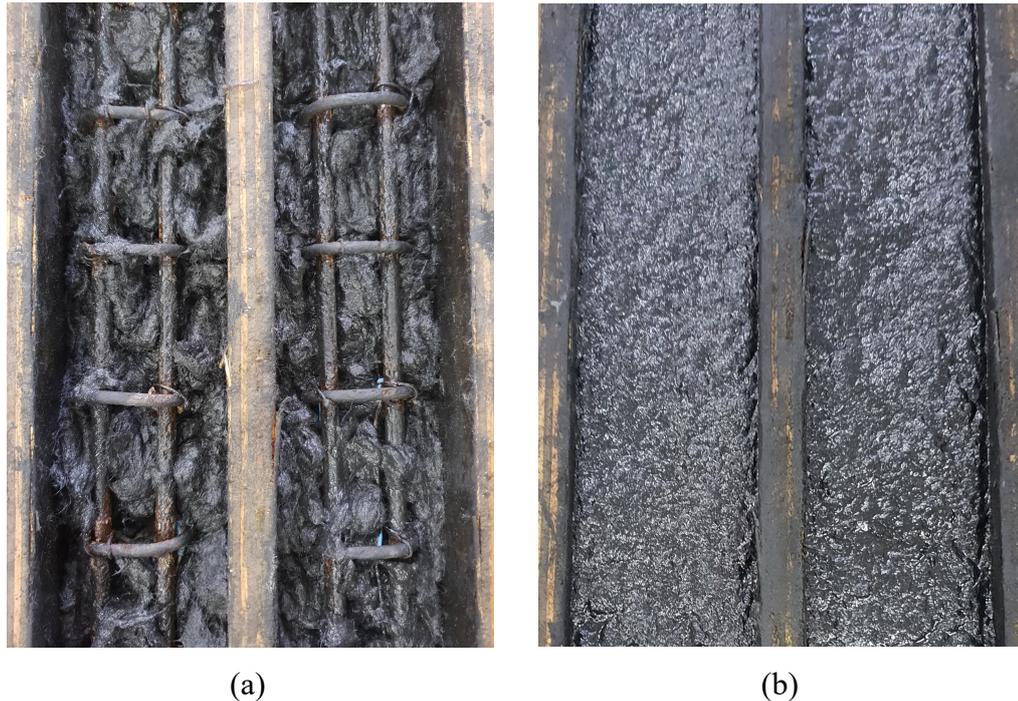


(Fonte: foto do autor)

O ECC utilizado para reparo das vigas foi produzido em betoneira de eixo vertical, seguindo a ordem de mistura: materiais secos (cimento, areia e cinza da casca de arroz), água e aditivo e, por fim, a fibra de polipropileno, adicionadas aos poucos. A superfície do concreto convencional foi umedecida para melhor receber o ECC. A moldagem do reparo das vigas foi realizada em duas camadas, e o adensamento de cada camada foi feito com o auxílio de uma

haste de aço com golpes distribuídos uniformemente em toda seção. A Figura 36 (a) apresenta a primeira camada após o adensamento. Para dar o acabamento final foi utilizada uma colher de pedreiro, o resultado final superfície pode ser observado na Figura 36 (b). Os corpos-de-prova foram desmoldados após 1 dia, e curados em câmara úmida, utilizando o mesmo procedimento dos moldados em concreto convencional.

Figura 36 – Etapas do reparo das vigas em ECC



(Fonte: foto do autor)

6.6 MÉTODOS E ENSAIOS

Neste item são descritos os diversos ensaios empregados na pesquisa. A combinação dos experimentos selecionados para integrar o programa experimental visa avaliar o potencial do ECC como possível material para reparo de vigas de concreto armado, analisando parâmetros de resistência e aderência com o concreto velho.

6.6.1 Compressão Uniaxial

Este ensaio foi realizado tomando como parâmetros as recomendações da norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007): Concreto – Ensaio de Compressão de corpos cilíndricos. A ruptura dos corpos de prova foi realizada na prensa Shimadzu do LEME. Os corpos de prova

foram elaborados com material proveniente das mesmas concretagens com as quais se moldaram as vigas para os ensaios de resistência à tração na flexão e do reparo. A Tabela 12 apresenta estratégia experimental para este ensaio.

Tabela 12 – Estratégia experimental compressão uniaxial

	Concreto Convencional	ECC
Dimensões do corpo de prova	100x200 mm	50x100 mm
Idade de ruptura	7 e 28 dias	28 dias
Amostras ensaiadas	3 para cada idade	3 amostras

(Fonte: elaborado pelo autor)

6.6.2 Módulo de Elasticidade

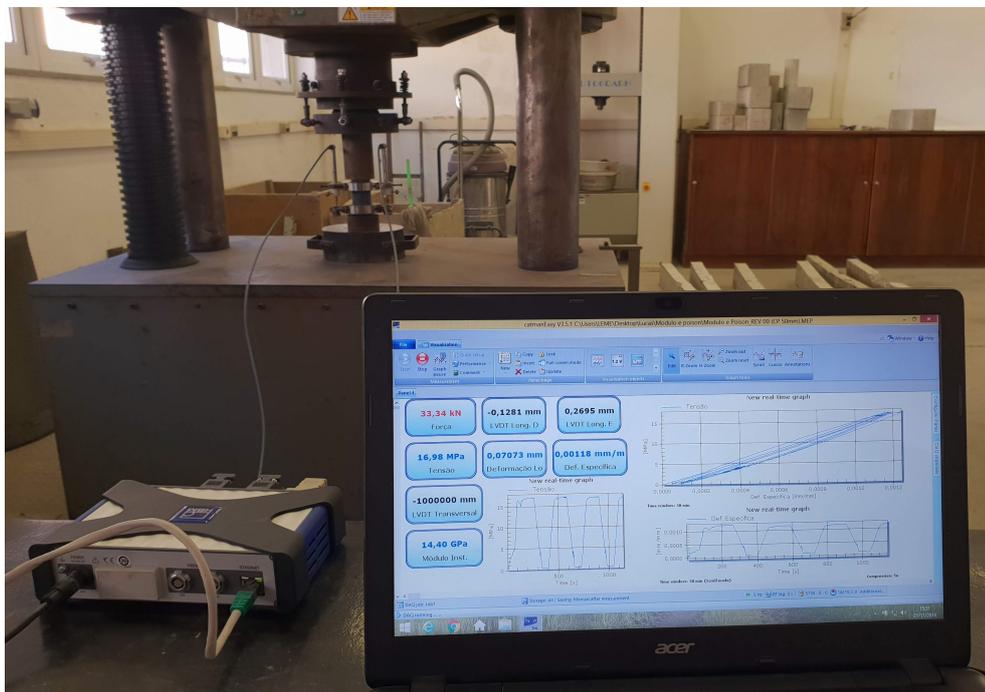
O ensaio de módulo de elasticidade seguiu a norma ASTM C469/C469M (2014): Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. O método define as tensões que devem ser aplicadas aos corpos-de-prova e o tempo em que o carregamento deve ser mantido, além da velocidade de sua aplicação. O ensaio consiste na aplicação de três ciclos de carregamento alcançando uma tensão de aproximadamente 40% da resistência à compressão do concreto. Com os resultados das tensões aplicadas aos corpos-de-prova e suas respectivas deformações sofridas durante o tempo de carregamento, é feito o diagrama tensão-deformação e determinado o módulo de elasticidade estático dos concretos. As tensões foram aplicadas aos corpos-de-prova pela prensa Shimadzu e os deslocamentos medidos pelos LVDTs. Nas Figuras 37 e 38 é mostrado o corpo-de-prova durante o ensaio de módulo de elasticidade e sistema de coleta de dados Spider.

Figura 37 – Corpo de prova instrumentado e pronto para iniciar o ensaio



(Fonte: foto do autor)

Figura 38 – Sistema de coleta de dados para o ensaio de módulo de elasticidade



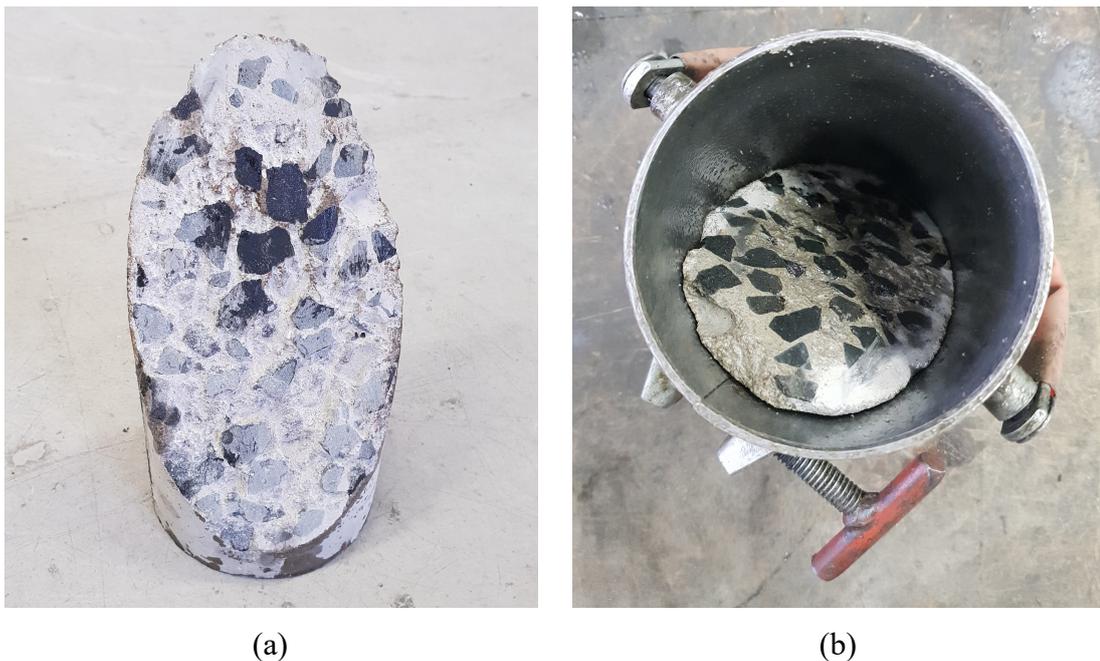
(Fonte: foto do autor)

6.6.3 Aderência pelo Método de Cisalhamento

Com o intuito de entender um pouco mais o comportamento do ECC e investigar a aderência desse compósito com concreto convencional, visando à utilização deste compósito como material de reparo, esse trabalho propôs realizar o ensaio de aderência fazendo algumas adaptações da norma americana ASTM C882 (2013): Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear.

Os corpos de prova mistos foram moldados em duas etapas. Primeiramente, realizou-se a moldagem do concreto convencional, e após 28 dias de cura foi realizado um corte no ângulo de 30° com a vertical. Para o desenvolvimento deste ensaio, foram feitas algumas adaptações da norma, utilizando somente apicoamento do concreto convencional como ponto de aderência entre os substratos, dispensando o uso da resina. A escolha por não utilizar nenhuma resina foi para conhecer a aderência que os compósitos podem desenvolver em substratos de concreto, além disso, a utilização de uma resina poderia encarecer ainda mais o uso deste compósito para utilização em reparos. A segunda etapa consiste na colocação do corpo de prova novamente na forma e moldagem do ECC em contato com o concreto convencional. A Figura 39 (a) apresenta o corpo de prova com a superfície de contato apicoada, e a Figura 39 (b) o corpo de prova dentro da forma para receber a camada de ECC.

Figura 39 – Preparação dos corpos de prova para a concretagem



(Fonte: foto do autor)

Para analisar a aderência pelo método de cisalhamento, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão na prensa Shimadzu do LEME. A Figura 40 mostra o corpo de prova misto de concreto convencional e ECC sendo ensaiado.

Figura 40 – Corpo de prova durante o ensaio de aderência pelo método de cisalhamento

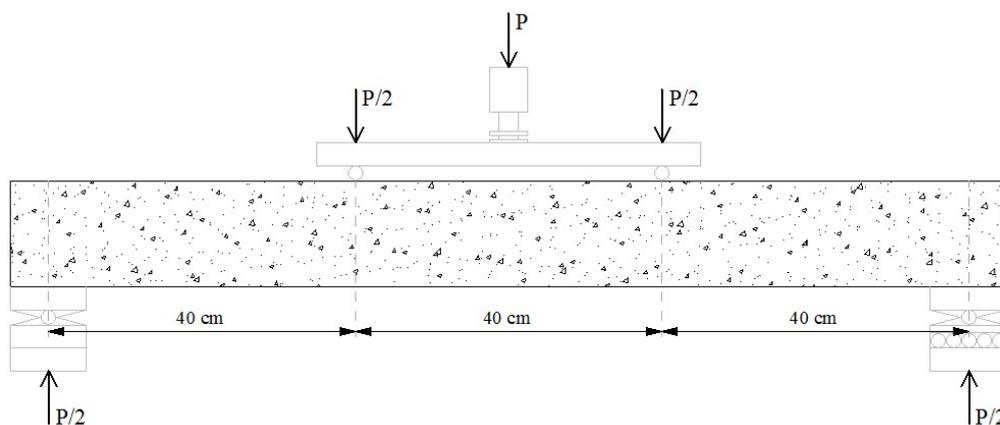


(Fonte: foto do autor)

6.6.4 Flexão a quatro pontos

Os ensaios de resistência à flexão nas vigas foram realizados considerando a configuração em quatro pontos, conforme o esquema da Figura 41.

Figura 41 - Croqui do ensaio de flexão a quatro pontos nas vigas



(Fonte: elaborado pelo autor)

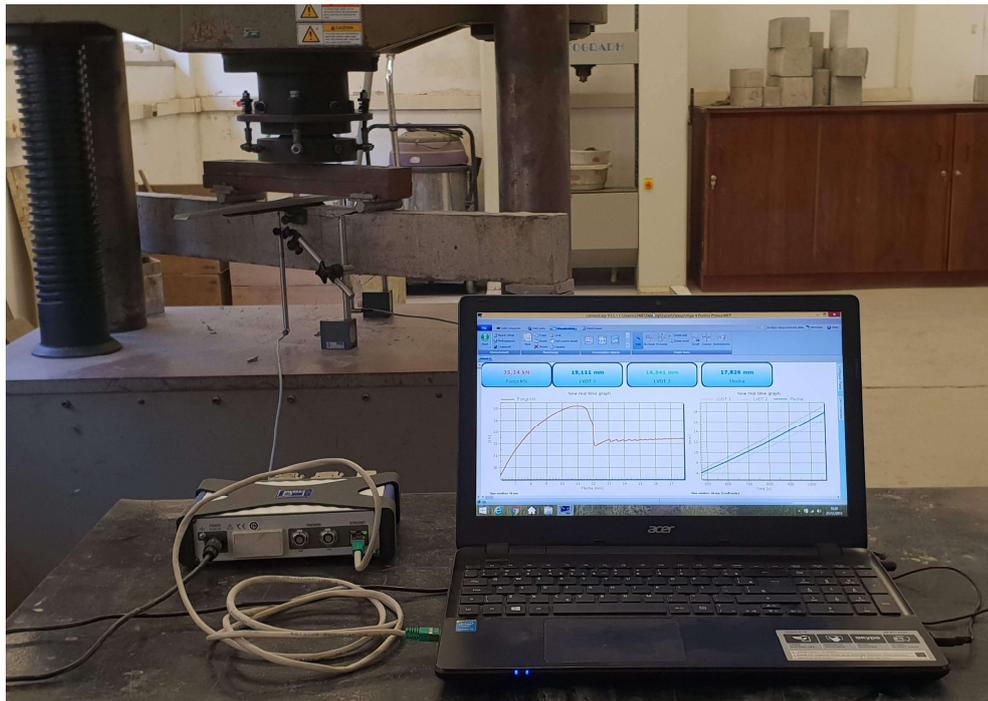
Como variáveis, foram avaliados o deslocamento ocorrido em função da carga aplicada. O deslocamento medido foi o do próprio equipamento: uma prensa Shimadzu modelo UFH com capacidade para 2000 kN, com a qual é possível aplicar uma velocidade de deslocamento constante. Para registrar as deflexões, foram instalados dois sensores LVDT para medir deslocamento do corpo de prova, localizados no centro do vão na vertical. Para coleta dos dados do ensaio utilizou-se o sistema Spider. As Figuras 42 e 43 mostram respectivamente o detalhe do LVDT instalado para registrar os deslocamentos e sistema de coleta de dados do ensaio.

Figura 42 – Detalhe do posicionamento dos LVDTs



(Fonte: foto do autor)

Figura 43 – Sistema de coleta de dados para o ensaio de flexão



(Fonte: foto do autor)

6.6.5 Determinação da perda de massa

Após o rompimento das vigas pelo ensaio de flexão a quatro pontos, pode-se determinar a perda de massa obtida no ensaio de corrosão. Para determinação da perda de massa, três vigas (uma de cada tipo) foram quebradas para retirada de dois fragmentos de 50 cm de comprimento da armadura longitudinal positiva. O trecho escolhido foi no centro do vão para que fosse considerada justamente a armadura mais solicitada. A Figura 44 mostra os fragmentos de barras retirados das vigas, duas barras das vigas referência, duas das vigas corroídas e duas das vigas reparadas com ECC, respectivamente.

Figura 44 – Sistema de coleta de dados para o ensaio de flexão



(Fonte: foto do autor)

Para limpeza das barras, foi utilizado o procedimento recomendado pela ASTM G1-03 (2003): Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. As barras foram imersas numa solução contendo 3,5g de hexametileno tetramina diluídos em 500 ml de ácido clorídrico e 500 ml água reagente, sendo mantidas na mesma por um período de tempo de 40 min.

Após a limpeza, é feita a pesagem das barras e calculado o valor de perda de massa devido ao processo corrosivo. O grau de corrosão é dado pela porcentagem de massa que foi consumida, em relação à massa inicial da barra de armadura, como mostrado na equação:

$$GC (\%) = \frac{m_{cons}}{m_{inic}} \times 100$$

Onde:

GC = grau de corrosão (%)

m_{cons} = massa consumida no processo de corrosão (g)

m_{inic} = massa inicial da barra de armadura (g)

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a cada experimento desenvolvido, bem como sua análise e interpretação. Os dados serão apresentados e discutidos, de modo a subsidiar as conclusões da pesquisa, apresentadas no capítulo final deste trabalho.

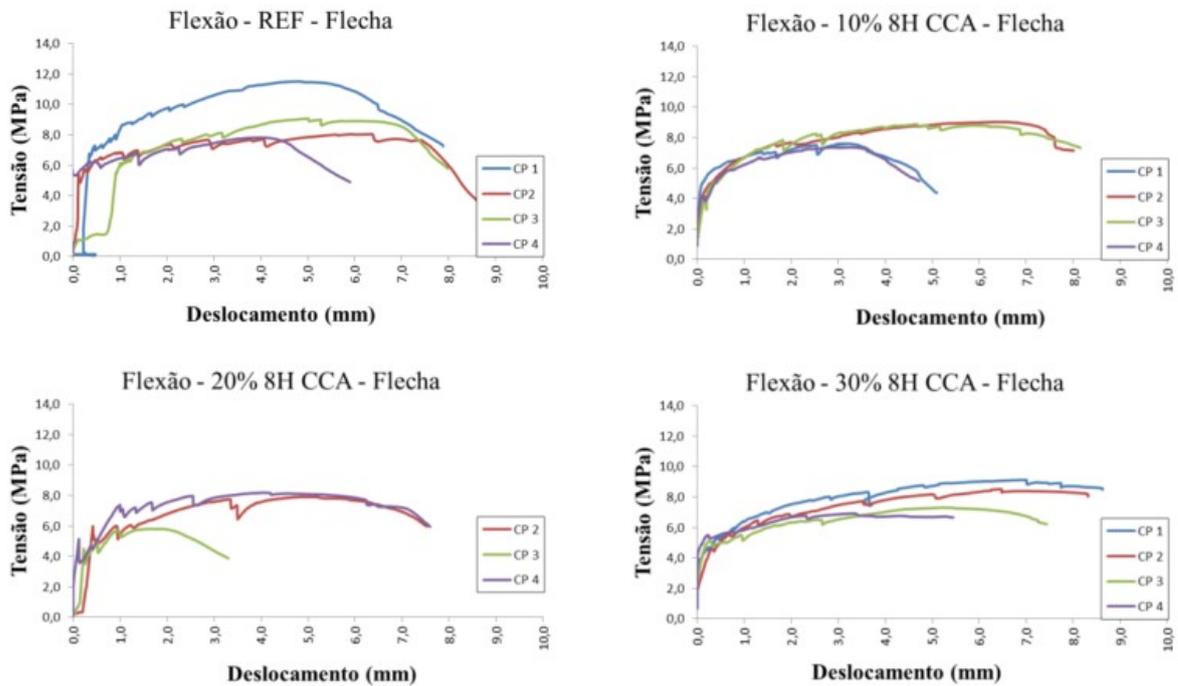
7.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Esta fase da pesquisa consiste na adequação e definição do traço do Engineered Cementitious Composite (ECC) que seria utilizado como reparo das estruturas de concreto armado. O traço utilizado nesta pesquisa tomou como base estudos desenvolvidos ao longo dos anos no LEME/UFRGS. Dando ênfase na sustentabilidade, e com o intuito de tornar o ECC um material mais verde, avaliou-se a substituição de 50% de cimento por cinza de casca de arroz com queima não controlada.

7.1.1 Flexão a Quatro Pontos

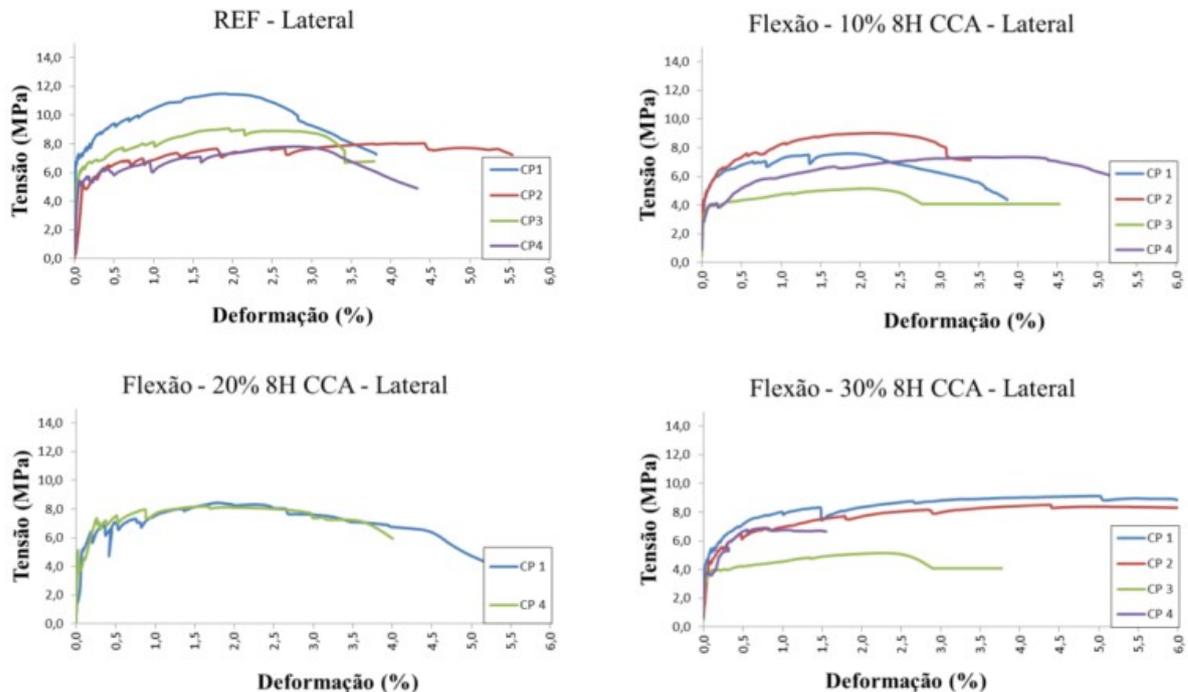
A caracterização dos compósitos com 50% de CCA foi realizada por meio de ensaios de resistência mecânica e alguns ensaios para análise de durabilidade. Os resultados adquiridos nestes ensaios foram avaliados em conjunto com dados obtidos em pesquisas com menores teores de substituição, realizadas anteriormente no laboratório, apresentados nas Figuras 45 e 46. Este comparativo revelou que substituição no teor de 50% de CCA demonstrou um desempenho semelhante de resistência mecânica em relação ao teor de 30% já avaliado anteriormente, manifestando um comportamento strain hardening (ganho de tensão após a abertura da primeira fissura) e múltipla fissuração bem evidente, que pode ser visualizado na Figura 47 e 48.

Figura 45 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na vertical



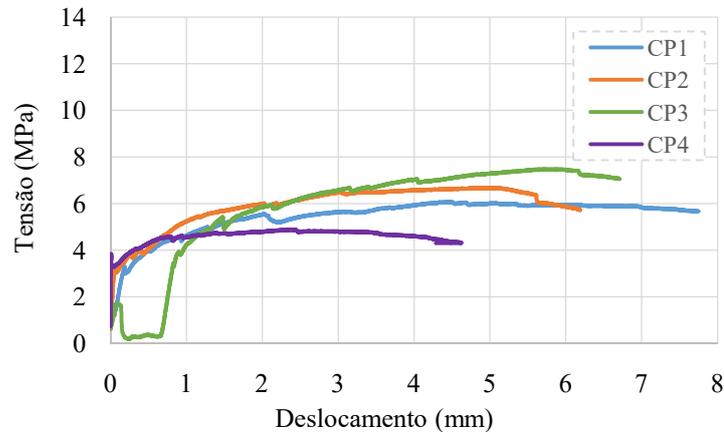
(Fonte: RIGHI, 2015)

Figura 46 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na lateral



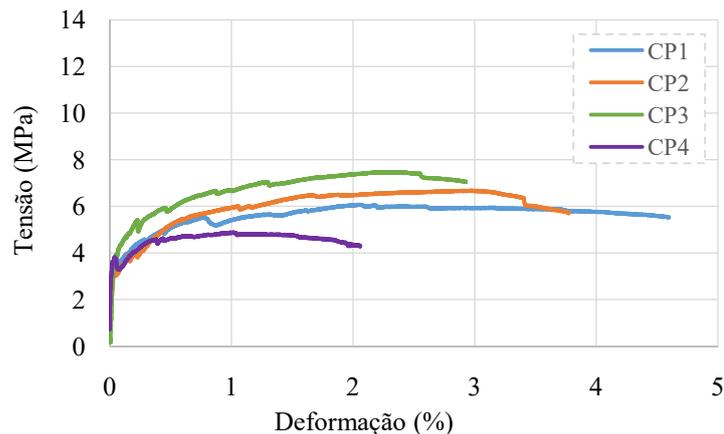
(Fonte: RIGHI, 2015)

Figura 47 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na vertical



(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 48 – Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na lateral



(Fonte: elaborado pelo autor)

7.1.2 Migração Íons Cloretos

Referente ao ensaio acelerado de penetração de íons cloretos, a carga Q obtida foi 824,76 Coulombs, calculada a partir das correntes médias. Quanto ao risco de penetração de íons cloretos, indicado pela ASTM C1202 (2012), foi classificado como muito baixo. Comparando com os dados obtidos por Pereira da Costa (2015) apresentados na Tabela 13, pode-se constatar que a incorporação de cinza reduziu, substancialmente, os valores de corrente e carga elétrica, isto ocorre devido à alteração da estrutura de poros, já que a possível descontinuidade e tortuosidade da rede de poros conferida pela presença da cinza acabam dificultando a passagem dos íons cloretos.

Tabela 13 – Cargas Q médias e avaliação qualitativa da penetrabilidade de íons cloreto

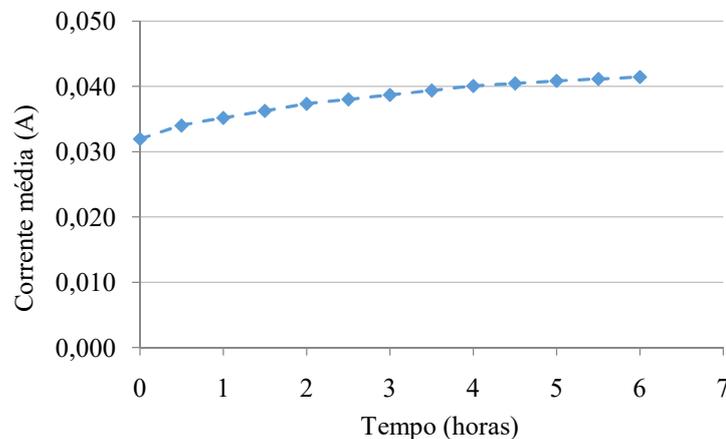
	Q média (Coulombs)	Penetrabilidade de íons cloretos
ECC - REF*	11729,00	Alto
ECC - 30% CCA	2735,00	Moderado
ECC - 50% CCA	824,76	Muito Baixo

*sem substituição de cimento por cinza de casca de arroz

(Fonte: adaptação Pereira da Costa, 2015)

A Figura 49 apresenta o gráfico das correntes médias em função do tempo, obtidas através da diferença de potencial aplicada nos corpos de prova.

Figura 49 – Correntes médias (A) obtidas no ensaio de penetração de íons cloretos

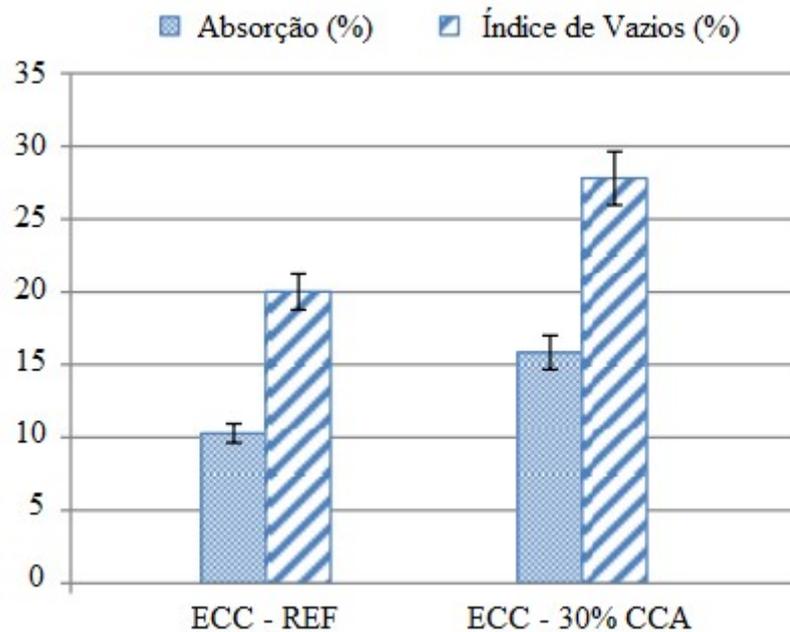


(Fonte: elaborado pelo autor)

7.1.3 Absorção e Índice de Vazios

Já para o ensaio de absorção e índice de vazios, o ECC com 50% de substituição apresentou um comportamento muito semelhante aos com menores teores de substituição, tendo um aumento de absorção e índice de vazios em relação à referência (sem substituição), com valores médios resultantes de 13,8% de absorção e 24,5% de índice de vazios. Esse comportamento pode ser explicado devido a CCA ter reações de hidratação mais lentas que o cimento. Os dados utilizados como comparativo foram obtidos por Pereira da Costa (2015) em sua tese de mestrado, apresentados na Figura 50.

Figura 50 – Valores médios de absorção de água e índice de vazios



(Fonte: adaptação Pereira da Costa, 2015)

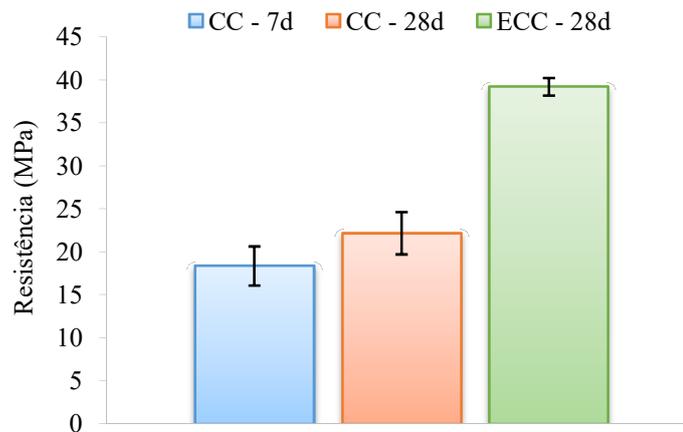
Portanto, os resultados do ECC com substituição de 50% de cimento por cinza de casca de arroz mostram que a adição parcial de CCA vem dando bons resultados em maiores teores, tanto em parâmetro de resistência mecânica quando em durabilidade destes compósitos. Em virtude disso, neste trabalho, optou-se por utilizar o traço com 50% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, diminuindo o consumo de cimento e proporcionando um material economicamente viável e ambientalmente sustentável.

7.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO REPARO

7.2.1 Compressão uniaxial

Primeiramente, para compreender melhor as características dos dois tipos de materiais utilizados foi realizada uma análise da resistência à compressão dos corpos de prova. A Figura 51 ilustra os resultados de resistência à compressão para o concreto convencional (denominado CC) nas idades de 7 e 28 dias e para o ECC na idade de 28 dias.

Figura 51 – Ruptura média dos corpos de prova à compressão



(Fonte: elaborado pelo autor)

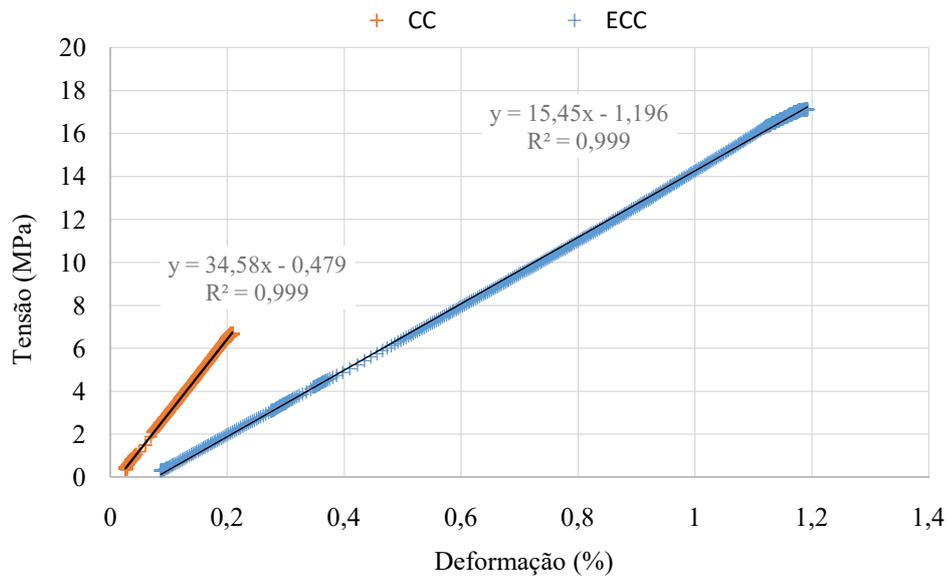
Para o concreto convencional, optou-se por realizar o ensaio aos 7 e 28 dias, pois o ensaio de corrosão nas vigas de concreto armado teve início com 7 dias de cura do concreto. Nota-se que o concreto convencional aos 7 dias alcançou resistência à compressão média de 18 MPa, já aos 28 dias este mesmo concreto obteve um aumento de 20% da sua resistência, apresentando resistência média de 22 MPa. A média de resistência à compressão normalmente encontrada em trabalhos anteriores para este traço foi de 30 MPa, provavelmente, por algum ruído experimental, este deu uma resistência inferior ao esperado. Para o ECC com 50% de CCA moída por 8 horas analisou-se somente a resistência a compressão aos 28 dias, com resistência média em torno de 40 MPa.

7.2.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é um parâmetro importante para analisar a compatibilidade do material de reparo com o concreto convencional. Para determinação do módulo de elasticidade, este foi calculado segundo a fórmula presente na Norma ASTM C469/C469M (2014), sendo que a média dos módulos de elasticidade calculados foram 30 GPa do concreto convencional e 14,8 GPa do ECC.

Também foi traçado o gráfico de tensão em função da deformação, encontrando a tangente da reta que representa a deformação elástica dos materiais. A Figura 52 apresenta as curvas representativas dos dois materiais estudados, concreto convencional (CC) e Engineered Cementitious Composite (ECC).

Figura 52 – Gráfico tensão x deformação dos concretos



(Fonte: elaborado pelo autor)

Observando o gráfico, nota-se que o módulo de elasticidade do material de reparo e do concreto são bem diferentes. O coeficiente angular da reta expressa o módulo de cada material, sendo 34,5 GPa do concreto convencional e 15,5 GPa do ECC, onde os valores encontrados foram maiores que os calculados pela fórmula apresentada na norma. Comparando os resultados dos dois materiais, constata-se que o coeficiente do módulo de elasticidade do ECC é menor que a metade do coeficiente do módulo do concreto convencional utilizado nesta pesquisa.

7.2.3 Aderência pelo método de cisalhamento

Nos resultados da união compósito-concreto pode ser observado que a resistência deste elemento foi de aproximadamente 35 MPa. Ou seja, percebe-se um aumento da resistência quando comparado ao resultado encontrado para os concretos convencionais, que foi de 22 MPa aos 28 dias. O tipo de ruptura destes corpos de prova foi monolítica atuando como um único elemento, somente um deles rompeu por deslizamento por falha na interface de aderência. A Figura 53 (a) apresenta o corpo de prova com rompimento monolítico, e a Figura 53 (b) mostra o corpo de prova que sofreu ruptura por deslizamento.

Figura 53 – Ruptura dos corpos de prova



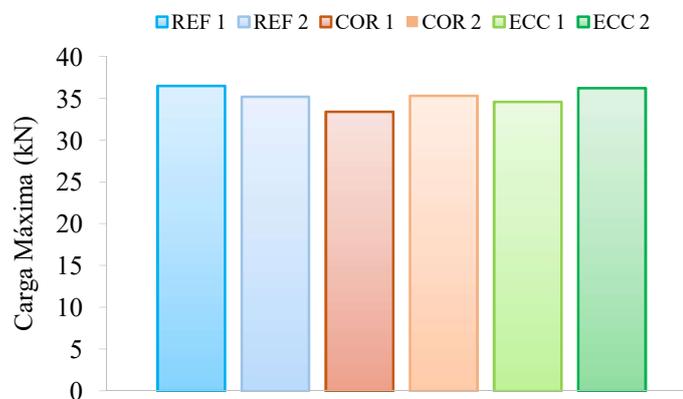
(Fonte: fotos do autor)

Este ensaio proporcionou uma análise preliminar da aderência entre o ECC e o concreto do elemento que será reparado, como um primeiro indicativo de que este material de reparo apresenta uma boa união com o concreto antigo e provavelmente não virá a deslocar.

7.2.4 Flexão a quatro pontos

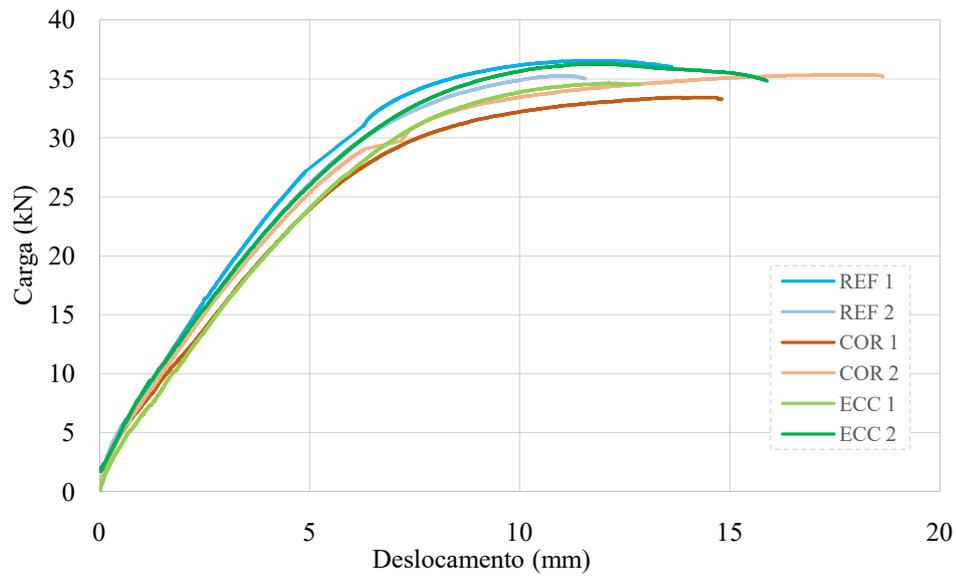
A Figura 54 e 55 mostram o gráfico com as cargas máximas atingidas de cada viga e o gráfico de carga em função do deslocamento das seis vigas ensaiadas. Nota-se pela análise do gráfico que as vigas de concreto armado apresentaram comportamento semelhante entre elas, tendo uma pequena variação da carga de ruptura após a corrosão e o processo de reparo com ECC.

Figura 54 – Gráfico com as cargas máximas das vigas



(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 55 – Gráfico da carga aplicada em função dos deslocamentos no centro do vão



(Fonte: elaborado pelo autor)

Alguns detalhes da ruptura das vigas podem ser observados na Figura 56 (a), (b) e (c) onde apresentam um exemplar da viga referência, da viga degradada pela corrosão e da viga reparada com ECC, respectivamente.

Figura 56 – Vigas após ensaio de flexão



(Fonte: fotos do autor)

Primeiramente, pode-se constatar que os três tipos de sistemas apresentaram ruptura por esmagamento do concreto na face superior central da viga. Além disso, referente à fissuração

pode se notar que as vigas submetidas ao processo de corrosão tiveram fissuras bem localizadas, isso se deve pelo fato de que a corrosão por cloretos não ser uniforme, tendo maior corrosão em pontos específicos. Outro ponto que pode ser observado é que a viga com reparo em ECC atuou como uma estrutura monolítica, o que não levou ao deslocamento da camada de reparo.

7.2.5 Determinação da perda de massa das barras

A porcentagem da perda foi baseada na massa das barras das vigas testemunho como referência, e o valor médio da massa que foi consumida nas vigas submetidas ao ensaio de corrosão. O valor da massa das barras encontra-se na Tabela 14. Pode-se constatar com este ensaio que a taxa de corrosão nas vigas foi de 8%, este grau de corrosão mais elevado se deve por algum ruído experimental.

Tabela 14 – Massa das barras após a limpeza

		Massa (g)	Taxa de corrosão (%)
REF	Barra 1	194,00	-
	Barra 2	191,50	-
COR	Barra 1	176,00	8,69
	Barra 2	177,50	7,91
ECC	Barra 1	177,50	7,91
	Barra 2	177,50	7,91

(Fonte: elaborado pelo autor)

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar o potencial dos Engineered Cementitious Composite (ECC) como reparo de vigas de concreto armado deterioradas pela corrosão da armadura, visando avaliar a resistência mecânica desses elementos. Além disso, também foi avaliada a utilização de um novo teor de substituição de cinza de casca de arroz por cimento, visando um material economicamente viável e ambientalmente sustentável.

Com o auxílio de análises preliminares, constatou-se que a substituição de cimento por cinza de casca de arroz, em maiores teores, vem dando bons resultados tanto à resistência mecânica quanto em durabilidade dos compósitos. Em virtude disso, optou-se por utilizar o traço com 50% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz, diminuindo o consumo de cimento e o custo do ECC. Além de viável tecnicamente, a adição de CCA, contribui também no sentido de dar um destino apropriado ao resíduo com queima não controlada, diminuindo assim os danos ao meio ambiente.

Os ensaios realizados ao longo deste trabalho mostraram que os três diferentes tipos de sistemas, viga referência, viga submetida ao processo de corrosão e viga submetida ao processo de corrosão reparada com ECC obtiveram desempenho semelhante frente à resistência mecânica, apresentando cargas de rupturas muito próximas e rompimento por compressão do concreto na parte superior da viga. As vigas submetidas à corrosão acelerada apresentaram uma pequena queda de carga de ruptura, além de um aumento no deslocamento no centro do vão comparado às vigas referência, este segundo pode ter sido causado por diminuição da área ou perda de resistência do aço. Referente às vigas reparadas com ECC, apesar de o ECC apresentar um módulo de elasticidade mais baixo que o concreto convencional, a utilização deste material não prejudicou o comportamento mecânico das vigas de concreto armado. Além disso, a resistência às contrações diferenciais entre o substrato de concreto e o ECC garantiu que o sistema de reparo não viesse a deslocar.

Apesar de o ECC ter apresentado um comportamento positivo quanto à aderência entre sistema de reparo e substrato de concreto, e não ter prejudicado a resistência mecânica das vigas mantendo a carga de ruptura das mesmas, esses fatos possivelmente não justificam sua

utilização com reparo de estruturas de concreto armado convencionais, por se tratar de um material com elevado custo comparado às argamassas de reparo comercializadas no mercado.

Embora esse material não apresentar viabilidade econômica para a aplicação em reparo de estruturas submetidas ao processo de corrosão de armaduras, esse já é empregado como reforço de estruturas em locais que apresentam grande frequência de abalos sísmicos. A bibliografia afirma que este material apresenta uma excelente capacidade de absorção de energia, apresentando um bom desempenho estrutural e tolerância a danos. O comportamento ultra dúctil do ECC, combinado com seus requisitos flexíveis de processamento, tornam-no, especialmente, adequado para elementos críticos em aplicações sísmicas ou locais de elevada vibração, como em ambientes fabris, por exemplo, onde um comportamento diferenciado é necessário.

Portanto, o Engineered Cementitious Composite (ECC) é um material com alto potencial, suas características especiais proporcionam ao compósito uma vasta aplicação, podendo ser utilizado tanto em pavimentos ou em estruturas de concreto, atuando como reparo ou como reforço. De forma geral, o ECC que vem sendo desenvolvido no Brasil com matérias-primas locais, como utilização de fibra de polipropileno e substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz (CCA), e está gerando resultados muito semelhantes aos desenvolvidos nos Estados Unidos e outros grupos de pesquisa. Os avanços para tornar o ECC mais verde necessitam de maior investigação, pois a utilização de CCA como substituinte do cimento tem proporcionado bons resultados em teores elevados, diminuindo o consumo de cimento e tornando estes materiais mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AMLEH, L.; MIRZA, S. Corrosion influence on bond between steel and concrete. **ACI Structural Journal**, v.96, n.3, p. 415-423, 1999.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução de Antônio Carmona e Paulo R.L. Helene, São Paulo, PINI, 1992, 104p.

ANDRADE, C.; MARTINEZ, I. Advanced methods of corrosion measurement in real concrete structures. In: Quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing. 2005, Olinda. **Proceedings: Fourth International Conference**. Olinda: ACI, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 5674**: Manutenção de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 9778**: Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR NM 52**: Agregados Agregado Miúdo – Determinação da Massa específica e Massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67**: Agregados – Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202**: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Philadelphia, 2012.

_____. **ASTM C 1609**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading). Philadelphia, 2010.

_____. **ASTM C469 / C469M-14**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Philadelphia, 2014.

_____. **ASTM C 882**: Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear. Philadelphia, 2013.

_____. **ASTM G1-03**: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. Philadelphia, 2013.

CABRERA, J. G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. **Cement and Concrete Research**, v.18, p. 47-59, 1996.

CAETANO, L. F. **Estudo do Comportamento da Aderência em Elementos de Concreto Armado Submetidos à corrosão e Elevadas Temperaturas**. 2008. 153 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

CASCUDO, O. **O controle da Corrosão de Armaduras de Concreto: inspeções e técnicas eletroquímicas**. 1.ed. São Paulo: PINI; Goiânia: UFG, 1997.

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

EMMONS, P.H.; VAYSBURD, A. M. Factors affecting the durability of concrete repair: the contractor's viewpoint. **Construction and Building Materials**. v.8, n.1, p. 5-16, 1994.

GARCEZ, E. O. **Investigação do Comportamento de Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. 2007. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. 1993. 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1986. 46p.

HELENE, P. R. L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. Tradução: Antônio Carmona e Paulo R. L. Helene. São Paulo: Pini, 1988. 119p.

LEPECH, M. D.; LI, V. C. Long Term Durability Performance of Engineered Cementitious Composites. **Journal of Restoration of Buildings and Monuments**, v. 12, n. 2, p. 119-132, 2006.

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

LI, M.; LI, V. C. Behavior of ECC/concrete layered repair system under drying shrinkage conditions. **International Journal for Restoration of Buildings and Monuments**, v. 12, n. 2, p. 143-160, 2006.

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., Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance. In Concrete Construction Engineering Handbook, Chapter 24, Ed. E. Nawy, Boca Raton: CRC Press, 2008.

MAGALHÃES, M.S. **Caracterização Experimental de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de PVA: processo de fratura, propriedades térmicas, deformações diferidas e estabilidade térmica**.2010. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

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

MEHTA, P.K. Rice Husk Ash – A unique supplementary cementing material. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE TECHNOLOGY (CANMET), 1992, Greece. **Proceedings...** Greece: Malhotra VM, 1992. p. 407–431.

MORENO Jr., R. **Estudo de fatores que afetam a aderência de argamassas de reparo para estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002, 202p.

PEREIRA DA COSTA, F.B. **Análise da Durabilidade de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

QIAN, S.; LI, V.C. Simplified Inverse Method for Determining the Tensile Strain Capacity of Strain Hardening Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v.5, n.2, p. 235-246, Jun, 2007.

RIGHI, D.P. **Caracterização do Comportamento de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação com a Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2015.

SAHMARAN, M.; LI, V. Engineered Cementitious Composites: Can Composites Be Accepted as Crack-Free Concrete? **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2164, p. 1-8, 2010.

SAHMARAN, M.; LI, V.C. Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 2, p. 72-78, 2008.

SAHMARAN, M.; LI, V.C.; Andrade, C. Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams. **ACI Materials Journal**, v.105, n.3, p. 243-250, Mai/Jun, 2008.

SOUZA, V. C.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: PINI, 1998. 262p.

TORRES, A. S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VAYSBURD, A.M.; EMMONS P.H. Concrete repair-a composite system: Philosophy, engineering and practice. **Restoration of Buildings and Monuments**, v.12, n.5/6, p. 423-436, Dez, 2006.

WEIMANN, M.B.; LI, V.C. Hygral behavior of engineered cementitious composite (ECC). **International Journal for Restoration of Buildings and Monuments**, v.9, n.5, p. 513-534, Out, 2013.