

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais



Dissertação de Mestrado

**POSSIBILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE CINZA VOLANTE E CINZA DE
CASCA DE ARROZ NA PRODUÇÃO DE *Engineered Cementitious
Composites***

Liane Porto Griep

Pelotas, 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais



Dissertação de Conclusão de Mestrado

**Possibilidade de incorporação de cinza volante e cinza de casca de arroz na
produção de *Engineered Cementitious Composites***

Liane Porto Griep

Pelotas, 2014

LIANE PORTO GRIEPP

Possibilidade de incorporação de cinza volante e cinza de casca de arroz na produção de *Engineered Cementitious Composites*.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mônica Garcez

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Silvana Da Dalt

Pelotas, 2014

Liane Porto Griep

Possibilidade de incorporação de cinza volante e cinza de casca de arroz na produção de *Engineered Cementitious Composites*.

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 05 de setembro de 2014.

Banca examinadora:

.....
Prof(a). Dr (a). Mônica Garcez (Orientadora)

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof (a) Dr(a) Silvana Da Dalt (Coorientadora)

Doutora em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof(a) Dr(a) Ângela Azevedo de Azevedo

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

.....
Prof. Dr. Antonio Takimi

Doutor em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico esse trabalho aos meus pais, Luiz Carlos Griep e Éva Rosângela Porto Griep; a meu irmão Cássio Porto Griep e a minha avó Maria da Rocha Porto (*in memoriam*).

Agradecimentos

Agradeço a minha família por todo apoio, dedicação e incentivo para realização deste trabalho.

A todos meus amigos pela força oferecida nas horas difíceis, principalmente ao Pedro G. Moreira e à Daiane Landarin.

À amiga Prof^a. Dr^a. Ângela A. de Azevedo que me incentivou a realizar esta pós-graduação e me apresentou a Prof^a. Dr^a. Mônica R. Garcez.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Mônica R. Garcez pela orientação, apoio, compreensão e toda a dedicação, permitindo a conclusão deste trabalho assim como minha co-orientadora Prof^a Dr^a Silvana Da Dalt.

Ao coordenador do PPGCEM, Prof. Dr. Sergio Cava, por todo o apoio e dedicação.

À Prof^a. Dr^a. Estela O. Garcez, que me orientou e acompanhou o desenvolvimento deste trabalho.

Aos bolsistas Rafael Delucis, Bruno NoreMBERG, Gian Pagonotto, Guilherme Maron, Augusto Piva e Kátia Born.

Aos Laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal de Pelotas e Universidade Católica de Pelotas, que disponibilizaram toda a infraestrutura necessária para realização dos ensaios.

Ao Eng^o. Marco Antônio L. Moreira (coordenador do EMEA) e à Universidade Católica de Pelotas que incentivaram a realização deste mestrado, flexibilizando meu horário de trabalho.

A todos aqui citados e mesmo aos que não mencionei sou grata por todo apoio e incentivo.

Resumo

GRIEPP, Liane Porto. **Possibilidade de incorporação de cinza volante e cinza de casca de arroz na produção de *Engineered Cementitious Composites***. 2012, 92fs. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.

Os *Engineered Cementitious Composites* - *ECC* – são um tipo especial de compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibra, cuja principal característica é a alta ductilidade. O traço de *ECC* é composto por cimento, material pozolânico, agregado miúdo e fibras de polipropileno. O presente estudo teve como objetivo avaliar a possibilidade de utilizar, em *ECC*, materiais pozolânicos produzidos na região sul do Brasil, sendo eles: cinza de casca de arroz (com e sem processo de queima controlada) e cinza volante, resíduos da indústria de arroz e da indústria geradora de energia elétrica no Rio Grande do Sul, respectivamente. Desenvolveram-se traços, combinando os seguintes materiais: cimento, cinza de casca de arroz sem controle de queima, cinza de casca de arroz com queima controlada, cinza volante, areias silicosas com granulometrias 75 μ m e de 150 μ m e fibra de polipropileno. Após a caracterização dos materiais, foram produzidas seis combinações de traços. As placas confeccionadas foram submetidas a ensaios mecânicos de tração na flexão e compressão. Como o material pozolânico tende a apresentar um melhor desempenho ao longo do tempo, cada traço foi submetido aos ensaios em duas idades, aos 56 e 91 dias. Avaliou-se também a aderência das fibras a pasta cimentícia, através de microscopias eletrônicas de varredura. Por fim, com os resultados cargas x deslocamento vertical, obtidos no ensaio de tração na flexão, avaliou-se o efeito *strain hardening*. Os resultados demonstram que é viável a utilização dos materiais pozolânicos estudados nesta pesquisa nos traços de *ECC*.

Palavras-chave: compósitos cimentícios; materiais pozolânicos; compósitos cimentícios com adição de fibras de polipropileno.

Abstract

Griepp, Liane Porto. **Possibility of incorporating fly ash and rice husk ash in Engineered Cementitious Composites**. 2012, 92fs. Thesis (Master of Engineering and Materials Science) - Graduate Program in Materials Science and Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas, 2014.

Engineered Cementitious Composites - ECC - are a special type of high performance cementitious composite reinforced with fiber, whose main characteristic is the high ductility. ECC are composed of cement, pozzolanic material, aggregate and polypropylene fibers. The present study aimed to evaluate the possibility of using pozzolanic materials produced in the southern Brazil, namely: rice husk ash (with and without controlled burning process) and fly ash, wastes originated from the rice and electric power industry. Mix design was determined, combining cement, rice husk ash (with and without burning control), fly ash, sand with particle sizes of 75 μ m and 150 μ m and polypropylene fibers. Following the characterization of materials, specimens with six different mix design were produced and subjected to compression and bending tests. Due to the use of pozzolanic material, tests were performed in two ages, 56 and 91 days. Images of fibers and cement paste interface were also evaluated, by scanning electronic microscopy. Finally, the effect of strain hardening was evaluated. Results demonstrate that the use of pozzolanic materials studied in this research is feasible, to produce ECC.

Keywords: cement composites; pozzolanic materials; composite cement with the addition of polypropylene fibers.

Lista de Figuras

Figura 1 - Organograma da dissertação.	17
Figura 2 - Fluxograma de classificação dos compósitos de acordo com o tipo de fase de reforço.	19
Figura 3 - Esquema de distribuição das fases que compõem os compósitos reforçados com fibras. .	24
Figura 4 - Distribuição da tensão em um compósito cimentício: sem adição de fibras e com adição de fibras.	27
Figura 5 – Comportamento <i>strain-hardening</i> de um compósito tipo PPECC (ECC reforçado com fibras de polipropileno) sob ação de esforços de flexão.	33
Figura 6 - Comparativo do processo de fissuração entre concreto convencional (a) e ECC (b)	33
Figura 7 - Curva tensão-abertura de fissuras para um material com comportamento <i>strain-hardening</i>	35
Figura 8 – Ilustração dos tipos de abertura de fissuras em ECC (a) fissuras padrão – abertura igual ou maior que uma polegada; (b) fissuras planas - abertura inferior a uma polegada.	36
Figura 9 – Efeito <i>coating</i> no processo de arrancamento das fibras de PVA (a) Fibra sem tratamento (b) Fibra tratada superficialmente.	37
Figura 10 - Efeito da alteração da propriedade das fibras de PP na curva $\sigma - \delta$	37
Figura 11 - Processo esquemático do processo de fissuração e gráfico tensão deformação.	38
Figura 12 - Amostras de cinza de casca de arroz (a) sem controle de queima. (b) com controle de queima. (c) DRX da cinza sem controle de queima (forma cristalina). (d) DRX da cinza com controle de queima (forma amorfa).	39
Figura 13 - Gráficos de resultados do ensaio à flexão a 4 pontos. (a) traço sem utilização de cinza volante na sua composição. (b) traço utilizando cimento, sílica e cinza volante na composição. (c) traço sem utilizar sílica em sua composição.	41
Figura 14 - Análise de microscopia eletrônica de varredura (a) PPECC1; (b) PPECC5. (c) PPECC3.	42
Figura 15 - Esquema de fases do programa experimental.	43
Figura 16 - Difratogramas para a CV, CCA e CCC – Difratorômetro, marca SHIMADZU, modelo XDR 6000, com intervalo de medida na faixa de 10° a 60° de 2 θ e passo a cada um segundo de 0,02°.	51
Figura 17 - Separação dos materiais, por peso.	57
Figura 18 - Homogeneização dos materiais secos.	57
Figura 19 - Inserção de água e aditivo com mistura por dois minutos para obtenção de uma pasta com textura plástica e homogênea e inserção das fibras de PP com mistura por 5 minutos.	58
Figura 20 - Moldagem dos nove corpos de provas cilíndricos, seguindo a NBR 7215 (ABNT, 1997) e nove corpos de provas prismáticos, seguindo a ASTM C 78-02 (ASTM, 2002).	58
Figura 21 - Utilização da mesa vibratória para a finalização da moldagem.	58
Figura 22 - Desmoldagem após 24 horas para posterior cura em tanque de água até serem submetidos aos ensaios.	59
Figura 23 - Ensaio de flexão a quatro pontos.	59
Figura 24 - Esquemática do ensaio de flexão.	60
Figura 25 - Exemplos de fissuras geradas após a ruptura do corpo de prova no ensaio de tração na flexão.	61

Figura 26 - Resistência à compressão axial.	64
Figura 27 - Comportamento carga x deslocamento aos 56 e 91 dias.	66
Figura 28 - Exemplo de comportamento à flexão de concreto, PRC e PVAECC.....	67
Figura 29 - Comportamento carga x deslocamento para cada compósito.	68
Figura 30 - Módulo de ruptura (MOR).....	70
Figura 31 - Configuração de fissuras aos 56 e 91 dias do PPECC1 PPECC3 e PPECC5.....	71
Figura 32 - Configuração de fissuras aos 56 e 91 dias do PPECC2 PPECC4 e PPECC6.....	71
Figura 33 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC1 - ARI+CCA+200: (a) 56 dias; (b) 91 dias.....	74
Figura 34 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC2 - ARI+CCA+80/100: (a) 56 dias; (b) 91 dias.....	74
Figura 35 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC3 - ARI+CV+200: (a) 56 dias; (b) 91 dias.....	75
Figura 36 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC4 - ARI+CV+80/100: (a) 56 dias; (b) 91 dias.....	75
Figura 37 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC5 - ARI+CC+200: (a) 56 dias; (b) 91 dias.....	76
Figura 38 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC6 - ARI+CCC+80/100: (a) 56 dias; (b) 91 dias.....	76
Figura 39 - Aspecto de um padrão de fissuração de um compósito de ECC.....	77
Figura 40 - Imagens por MEV dos compósitos aos 56 dias: (a) PPECC1; (c) PPECC2; (e) PPECC3. Magnificação: 40X. e (b) PPECC1; (d) PPECC2; (f) PPECC3 Magnificação: 1000x.....	79
Figura 41 - Imagens por MEV dos compósitos aos 56 dias: (g) PPECC4; (i) PPECC5; (k) PPECC6. Magnificação: 40x; (h) PPECC4; (j) PPECC5; (l) PPECC6. Magnificação: 1.000x.....	80
Figura 42 - Imagens por MEV dos compósitos aos 91 dias: (a) PPECC1; (c) PPECC2; (e) PPECC3 (Magnificação 40x) e (b) PPECC1; (d) PPECC2; (f) PPECC3 (Magnificação 1.000x).....	81
Figura 43 - Imagens por MEV dos compósitos aos 91 dias: (g) PPECC4; (i) PPECC5; (k) PPECC6 (Magnificação 40x) e (h) PPECC4; (j) PPECC5; (l) PPECC6 (Magnificação 1.000x).....	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de cimentos comercializados no Brasil.....	21
Tabela 2 - Propriedades Químicas – valores expressos em porcentagem (%)	29
Tabela 3 – Parâmetros Físicos – valores expressos em porcentagem (%)	29
Tabela 4- Caracterização química do cimento CP V ARI RS, obtida através do espectrômetro de raios X.	44
Tabela 5- Ensaio de massa específica e unitária para o cimento CP V ARI RS.	45
Tabela 6 - Caracterização química dos materiais pozolânicos, obtida através do espectrômetro de raios X.	46
Tabela 7 - Diâmetro médio das partículas de CCA de acordo com o tempo de moagem.	47
Tabela 8 - Superfície específica das partículas de CCA de acordo com o tempo de moagem.	47
Tabela 9 - Granulometria a laser dos materiais pozolânicos.....	48
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de massa específica e unitária para os materiais pozolânicos. .	48
Tabela 11 - Índices de atividade pozolânica com cal e cimento.....	49
Tabela 12 - Ensaio de perda ao fogo dos materiais pozolânicos.	50
Tabela 13 – Exigências químicas e físicas segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012).	50
Tabela 14 - Propriedades da areia quartzosa #80/100.....	53
Tabela 15 - Propriedades sílica moída #200 da empresa Mineradora Jundu LTDA.....	53
Tabela 16 - Composição química, dos agregados miúdos, obtida através de espectrômetro de fluorescência de raios x.....	54
Tabela 17 - Resultados dos ensaios de massa específica e unitária da areia quartzosa e da sílica moída.....	54
Tabela 18 - Propriedades das fibras de polipropileno.	55
Tabela 19 - Proporção dos materiais utilizados nos traços de PPECC.....	56
Tabela 20 - Combinações de materiais utilizados nos traços de PPECC.	56
Tabela 21 - Quantidades de material, em peso (g), utilizadas nos diferentes traços para fabricação de 1.700 cm ³ PPECC.	56
Tabela 22 - Resistência à compressão axial aos 56 e 91 dias.....	63
Tabela 23 - Resultados do módulo de ruptura.....	70
Tabela 24 - Contagem do número de fissuras dentro do terço e total, aos 56 e 91 dias.	73

Lista de Abreviaturas, Símbolos e Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABNT NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas Normas Brasileiras

ABNT NM – Associação Brasileira de Normas Técnicas Normas

MERCOSUL

ACE- *Advanced Cementitious Materials*

ARI – Alta Resistência

CCA – Cinza de casca de arroz sem controle de queima

CCC – Cinza de casca de arroz com queima controlada

CV – Cinza volante

CP – Corpo de Prova

ECC – *Engineered Cementitious Composites*

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MRL- *Materials Research Laboratory*

NEMC – Núcleo de Estudos Materiais Compósitos

PP – Polipropileno

PVA – Polivinil Álcool

PPECC – Compósito cimentício de alta resistência reforçado com fibras de polipropileno

RS – Resistente a Sulfatos

SHCC – *Strain Hardening Cementitious Composites*

m – metros

cm – centímetros

mm – milímetros

µm – micrometros

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Metodologia.....	16
1.3	Estrutura da dissertação.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Materiais Compósitos	18
2.2	Compósitos Cimentícios.....	19
2.2.1	Cimento Portland.....	20
2.2.2	Água	21
2.2.3	Aditivos.....	22
2.2.4	Agregados	23
2.3	Compósitos cimentícios reforçados com fibras	23
2.3.1	Propriedades necessárias às fibras.....	25
2.4	Compósitos Cimentícios com adição de materiais pozolânicos	28
2.4.1	Cinza volante (CV)	29
2.4.2	Cinza de casca de arroz (CCA)	30
2.5	<i>Engineered Cementitious Composites (ECC)</i> – compósito cimentício de alto desempenho.....	31
2.5.1	A importância da micromecânica para concepção de um <i>ECC</i>	34
2.5.2	Comportamento individual da fibra em um <i>ECC</i>	36
2.5.3	Compósitos com base nos materiais constituintes	37
2.5.4	Análise das fissuras.....	38
2.5.5	As adições de materiais pozolânicos em <i>ECC</i>	39
2.5.6	Comportamento mecânico dos <i>ECCs</i>	40
3	METODOLOGIA	43
3.1	Programa experimental	43
3.2	Materiais.....	44

3.2.1	Cimento.....	44
3.2.2	Materiais pozolânicos.....	45
3.2.3	Agregado Miúdo.....	52
3.2.4	Fibra de polipropileno.....	54
3.2.5	Aditivo.....	55
3.2.6	Água.....	55
3.3	Produção dos PPECC.....	55
3.3.1	Traços de PPECC.....	55
3.3.2	Moldagem e cura dos PPECC.....	57
3.4	Ensaio para determinação das propriedades mecânicas dos PPECC.....	59
3.4.1	Compressão axial - NBR 7215 (ABNT, 1997).....	59
3.4.2	Tração na flexão - ASTM C 78-02 (ASTM, 2002).....	59
3.5	Fissuração.....	61
3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	61
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
4.1.1	Compressão axial.....	63
4.1.2	Tração na flexão.....	66
4.1.3	Fissuração.....	70
4.1.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	77
5	CONCLUSÕES.....	83

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a possibilidade de incorporação de materiais pozolânicos disponíveis na Região Sul do Brasil na produção de *Engineered Cementitious Composites (ECC)* reforçados com fibras de polipropileno.

O *ECC* é um tipo especial de compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras, cujo principal característica é a altíssima ductilidade (GARCEZ, 2009 p.1). Um grupo de pesquisa da Universidade de Michigan, liderado pelo professor Victor Li, foi o responsável pelo desenvolvimento de um compósito de alto desempenho reforçado com fibras de polivinil álcool (PVA), onde os resultados se apresentaram muito satisfatórios. Garcez (2009, p.1), em seus estudos, igualmente desenvolvidos na Universidade de Michigan, desenvolveu uma pesquisa propondo a substituição da fibra PVA pela fibra de polipropileno (PP), por esta ser comercializada no Brasil. Posteriormente, estudos desenvolvidos na Universidade Federal do Rio Grande do Sul por Casagrande (2012, p.4) investigaram a incorporação de cinza volante na composição da matriz cimentícia do *ECC*, sendo esta cinza um resíduo proveniente da geração de energia em usinas termoelétricas.

No sentido de continuar as investigações brasileiras para o desenvolvimento de traços de *ECC*, o presente trabalho buscou avaliar a composição dos traços de *ECC* utilizando diferentes resíduos industriais, disponíveis na Região Sul do Brasil, especificadamente cinza de casca de arroz (com e sem controle de queima) e cinza volante, em busca do que apresentasse os melhores resultados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a incorporação de cinza volante e cinza de casca de arroz no desenvolvimento de traços de *Engineered Cementitious Composites* reforçados com fibras de polipropileno – *PPECC*, de forma a produzir este compósito com materiais disponíveis no Brasil.

1.1.2 Objetivos Específicos

De forma a atender o objetivo geral, os objetivos específicos foram delineados, conforme detalhado a seguir:

- Desenvolver traços de *ECC* com incorporação, na matriz do compósito, de cinza volante e cinza de casca de arroz, com e sem controle de queima, originários de indústrias da região sul do Brasil;
- Avaliar a possibilidade de utilizar fibras de polipropileno (PP) com adição de superplastificante.
- Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno (PPECC) produzidos quanto à:
 - Resistência à compressão, a partir do ensaio de compressão axial;
 - Comportamento à flexão estática, a partir do ensaio de flexão em quatro pontos;
 - Fissuração;
- Analisar a microestrutura dos PPECC desenvolvidos a partir de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

1.2 Metodologia

O trabalho foi dividido em quatro etapas, que estão descritas a seguir e ilustradas na figura 1.

Na Fase 1, chamada de revisão bibliográfica, buscou-se um embasamento teórico que viabilizasse o desenvolvimento da pesquisa e foram apresentados conceitos fundamentais e resultados de pesquisas que foram utilizadas como norteadores para o desenvolvimento deste estudo. A segunda etapa, chamada Fase 2, remete ao desenvolvimento do programa experimental, que envolveu a caracterização dos materiais, a elaboração das matrizes do compósito e a execução dos ensaios. Na Fase 3 foi realizada a análises dos resultados, que permitiu que se chegasse às conclusões, que correspondem à Fase 4 deste trabalho.

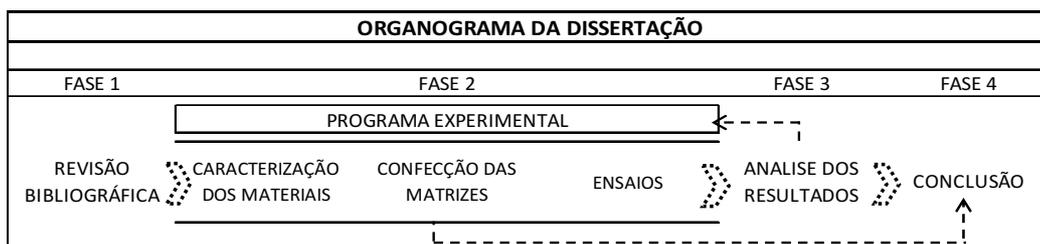


Figura 1 - Organograma da dissertação.

Fonte: autora.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos, conforme descrito no parágrafo a seguir:

O primeiro capítulo é a Introdução, onde é apresentada a importância da pesquisa, os objetivos (geral e específicos), a metodologia a ser aplicada e a estrutura de apresentação da dissertação. Já o segundo capítulo, é constituído da Revisão Bibliográfica sobre materiais compósitos, compósitos cimentícios reforçados com fibras e utilização de adições minerais do tipo de cinza volante e de casca de arroz. O terceiro capítulo aborda o desenvolvimento do Programa Experimental, onde são descritos os materiais utilizados e os ensaios realizados para a obtenção dos objetivos propostos. O capítulo quarto apresenta a análise dos resultados obtidos. O quinto capítulo contempla as considerações finais, que são as conclusões obtidas com o desenvolvimento do programa experimental.

Ao final, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na elaboração do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos de suma importância para o entendimento do comportamento dos compósitos cimentícios reforçados com fibras. Primeiramente serão apresentados conceitos sobre compósitos e seus componentes. Em seguida serão discutidos os diferentes tipos de materiais constituintes e a contribuição de cada um na melhoria das propriedades dos compósitos. Finalmente, será apresentado o compósito denominado *ECC*, um tipo avançado de compósito cimentício que será a base para o desenvolvimento do *PPECC*, proposto neste trabalho.

2.1 Materiais Compósitos

Segundo Callister (2008, p.308) é importante conhecer os vários tipos de materiais compósitos, assim como, compreender a dependência de seu comportamento de acordo com as características, as quantidades relativas, a geometria da fase dispersa (neste contexto entende-se por “geometria da fase dispersa”, a forma, tamanho, distribuição e orientação das partículas) e as propriedades das fases constituintes. Só assim podemos projetar materiais que combinem propriedades e melhorem o desempenho apresentado pelos materiais utilizados atualmente.

A maioria dos compósitos criados tem como finalidade melhorar combinações de propriedades mecânicas, tais como rigidez, tenacidade e resistência nas adversas condições ambientais. A figura 2 mostra uma classificação para os materiais compósitos segundo Callister (2008, p.360).

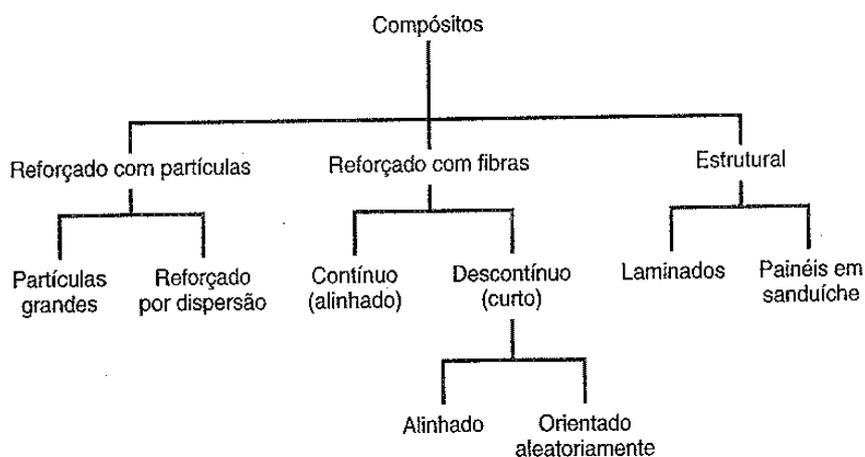


Figura 2 - Fluxograma de classificação dos compósitos de acordo com o tipo de fase de reforço.

Fonte: CALLISTER (2008, p.360).

2.2 Compósitos Cimentícios

Os materiais cimentícios podem ser considerados como os materiais mais importantes de todas as épocas da civilização humana, de acordo com Isaia (2005 p.1159), pois se trata da matéria-prima que possibilitou suprir as necessidades de edificações e obras de infraestrutura.

O exemplo mais tradicional de um compósito cimentício é o concreto, formado, em geral, pela mistura de aglomerantes (cimento, cal e gesso), agregados miúdos (material passante pela peneira 4,75mm e retidos na peneira 0,15mm), agregados graúdos (material passante na peneira 75mm e retido na peneira 4,75mm) e água. É considerado o compósito cimentício mais utilizado na engenharia civil. O concreto é, segundo Callister (2008, p.362), um material compósito reforçado com partículas grandes, conforme apresentado na figura 2. O termo “grande” é usado para indicar que as interações partícula-matriz não podem ser tratadas no nível atômico ou molecular. Para estes compósitos a fase particulada é mais dura e mais rígida do que a matriz e tendem a restringir o movimento de fase. A matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, as quais suportam uma parcela de fração de carga. O grau de reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende de uma ligação forte na interface matriz-partícula.

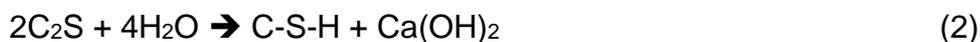
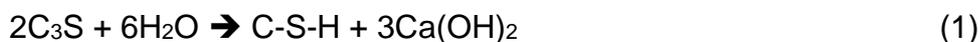
Apesar dos constituintes básicos dos compósitos cimentícios não terem se modificado muito nos últimos anos, a não ser no uso de aditivos para lhe conferir propriedades especiais, de acordo com Isaia (2005, p.1327), sua tecnologia evoluiu significativamente com o avanço do conhecimento da microestrutura da pasta e, principalmente, da interface com o agregado. De acordo com Neville (2003), é possível a obtenção de um compósito durável utilizando os conhecimentos existentes sem a necessidade de técnicas refinadas, transformando-o em um material de alta tecnologia pela simples realização de dosagem correta e execução apropriada, levando em conta os fatores que influem nas propriedades e comportamento deste compósito na estrutura real. Os estudos que tratam da microestrutura abordam, em geral, a utilização de adições pozolânicas, com diferentes granulometrias, não só para atribuir um maior desempenho ao compósito, mas também para reduzir o custo de produção. Quanto à utilização de fibras, sua utilização visa, principalmente, obter um comportamento mais dúctil.

A seguir são descritos os materiais que compõem os compósitos cimentícios, como: cimento, agregados, aditivos, e adições como materiais pozolânicos e fibras. Na sequência se descreve um tipo específico de compósito reforçado com fibras, denominado *Engineered Cementitious Composites (ECC)*, cujos conceitos são de suma importância para o desenvolvimento dos compósitos reforçados com fibras de polipropileno com adição de materiais pozolânicos (PPECC), objetivo deste trabalho.

2.2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é produzido pelo processo de moagem e mistura de argila com minerais portadores de cal. A seguir, a mistura é submetida a uma temperatura de cerca de 1400°C, num forno rotativo; este processo é chamado de calcinação e produz mudanças físicas e químicas nas matérias primas. O produto resultante é denominado clínquer, composto pelos óxidos: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO e SO₃, que moídos resultam em um pó fino (clínquer) ao qual se adiciona uma pequena quantidade de gesso (CaSO₄ – 2H₂O) para retardar o processo de pega. A cura e o endurecimento deste material resultam de reações de hidratação que ocorrem entre os vários constituintes do cimento e a água que é adicionada. As equações 1 (C₃S - Silicato tricálcico) e 2 (C₂S – Silicato

bicálcico) referem-se às reações de hidratação dos silicatos presentes na composição do cimento, resultando em silicato de cálcio hidratado, (C-S-H ou $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$)



As reações de hidratação começam quando água é adicionada ao cimento. Estas se manifestam primeiramente com a pega (isto é, o enrijecimento da pasta até então plástica), que ocorre logo após a mistura. O endurecimento da massa continua, em um processo relativamente lento, por vários dias, ainda resultado da hidratação adicional.

Existem diferentes tipos de cimentos, conforme apresentado na tabela 1. Como o clínquer consome muita energia para ser produzido, além de liberar uma grande quantidade de CO_2 , cada vez mais busca-se usar o cimento Portland composto e almeja-se que a utilização do cimento Portland puro fique restrita a aplicações especiais.

Tabela 1 - Tipos de cimentos comercializados no Brasil.

SIGLA	DENOMINAÇÃO
CP I	Portland Comum
CP I - S	Portland Comum - adição de fíler carbonático
	Portland Comum - adição de escória ou pozolana
CP II - E	Portland Composto com escória
CP II - Z	Portland Composto com Pozolana
CP II - F	Portland Composto com Fíler
CP III	Portland de alto forno
CP IV	Portland pozolânico
CP V - ARI	Portland de alta resistência inicial

Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro, 2008, p.255.

2.2.2 Água

Segundo Atıcin (2000, p. 133), a água é o ingrediente essencial para formar o compósito cimentício. Isso por que ela é responsável por duas funções básicas: função física (fornece propriedades reológicas) e função química (produz as reações de hidratação). De acordo com o autor, a quantidade de água ideal seria a mínima necessária para desenvolver a resistência máxima do cimento e promover as propriedades necessárias para o lançamento da pasta.

Não é possível ainda controlar a exata quantidade de água a ser colocada para formação do compósito cimentício, pois algumas partículas de cimento tendem a flocular quando entram em contato com a água. Dentro desses flocos a partícula de água fica retida e impedida de lubrificar a mistura. A hidratação começa no exato momento que o cimento entra em contato com a água, isso por que o cimento contém partículas muito finas, ou seja, apresentando uma grande superfície de contato. Para proporcionar trabalhabilidade aos compósitos cimentícios é necessário usar mais água do que o necessário para hidratar as partículas de cimento por completo. A água adicional gera uma porosidade dentro da pasta, pois nunca irá se ligar a uma partícula de cimento, resultando no enfraquecimento das suas propriedades mecânicas e sua durabilidade.

2.2.3 Aditivos

O desafio de evitar a floculação do cimento Portland no momento da hidratação gerou a necessidade de encontrar aditivos químicos que conseguissem reduzir esse fenômeno e a quantidade de água. Esses aditivos são moléculas orgânicas com propriedades dispersivas que são utilizadas para neutralizar cargas elétricas presentes na superfície da partícula de cimento; podem ser usados como redutores de água, agentes dispersivos e superplastificantes (ATİCIN, 2000, p.136).

Metha e Monteiro (2008, p.297), descrevem que os superplastificantes podem reduzir de três a quatro vezes a quantidade de água para o amassamento de uma mistura. Segundo os autores, o aumento das propriedades mecânicas (resistência à compressão e à flexão) normalmente é proporcional à redução de água na relação água/cimento. As misturas de compósitos cimentícios em que se utilizam superplastificantes apresentam, quando comparadas com as que não utilizam, um aumento nas propriedades mecânicas. Estudos mais detalhados sobre a interação entre superplastificante e cimento são necessários, pois segundo Atıcin (2000, p.147), a dosagem de superplastificante que é utilizada para dar fluidez à pasta está diretamente ligada ao tipo de cimento; ou seja, quanto mais fino for o cimento, maior será a área específica da partícula e maior será a quantidade de superplastificante para obter a fluidez e trabalhabilidade necessária.

2.2.4 Agregados

Os agregados podem proceder de jazidas minerais, como as areias e britas, sendo chamados de agregados minerais naturais. Ou então podem ser materiais termicamente processados, como as argilas, folhetos expandidos e agregados produzidos de rejeitos industriais (escórias de alto forno e cinza volantes) esses são chamados de agregados artificiais.

São classificados em agregados graúdos, aqueles que as partículas apresentam mais de 4,75mm e ficam retidas na peneira de numeração 4, e agregados miúdos, são partículas com menos de 4,75mm e mais de 75 μ m (peneira número 200) (METHA E MONTEIRO, 2008, p.259).

Ao contrário do cimento os agregados são vistos como materiais inertes, utilizados para enchimento. Reduzem o custo do compósito, não entram em reações complexas com a água. As características que o levam a compor um traço são: porosidade, distribuição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial, resistência à compressão, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias existentes (METHA E MONTEIRO, 2008, p.259).

2.3 Compósitos cimentícios reforçados com fibras

Como bem destacado por Figueiredo (ISAIA, 2005, p.1327), o concreto, apesar de possuir uma serie de características que garantem a ele o posto de material mais utilizado no mundo, apresenta uma série de limitações, sendo seu comportamento frágil e sua baixa capacidade de deformação antes da ruptura as mais marcantes. Segundo Metha e Monteiro, (2008, p.517), a rápida propagação de microfissuras sob tensão aplicada é a responsável pela baixa resistência à tração deste material. Esse fato fez com que se acreditasse, originalmente, que a incorporação de fibras (umas próximas às outras) a esses compósitos ocasionaria no aumento da resistência tanto à tração quanto à flexão, pois as fibras poderiam obstruir a propagação de microfissuras.

Metha e Monteiro (2005, p.518) em seus estudos mostraram que, diferente do esperado, os compósitos cimentícios reforçados com fibras não oferecem melhoras na resistência, quando comparados a misturas que não levam fibras. Entretanto pesquisas mais recentes obtiveram resultados positivos, no que se refere à resistência e a tenacidade, quando utilizaram fibras como reforço em um

compósito cimentício. Isso devido à descoberta que, o efeito significativo nestas propriedades está diretamente ligado ao tipo de fibra e a fração volumétrica utilizada. Após estes resultados, os compósitos reforçados com fibras, passaram a ser utilizados em projetos estruturais avançados e até para aperfeiçoar estruturas. Ainda de acordo com os autores, a classificação desse tipo de compósito se dá em função da fração volumétrica de fibra que é adicionada aos compósitos, como apresentado a seguir:

Fração volumétrica baixa (menor que 1%): São utilizadas fibras para reduzir a fissuração por retração;

Fração volumétrica moderada (entre 1 e 2%): A presença da fibra, com essa proporção volumétrica, ocasiona em um aumento do módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto. Muito utilizado quando se necessita a absorção de energia, maior capacidade de resistência à delaminação, lascamento e fadiga.

Fração volumétrica alta (maior que 2%): São conhecidos como compósitos de alto desempenho reforçados com fibras. As fibras utilizadas nessa proporção levam ao endurecimento por deformação dos compósitos.

Os compósitos reforçados com fibras em geral possuem duas fases distintas, a pasta (matriz cimentícia) e as fibras. A figura 3 mostra a divisão das fases, de forma geral:



Figura 3 - Esquema de distribuição das fases que compõem os compósitos reforçados com fibras.

Fonte: (autora).

Figueiredo (ISAIA, 2005, p.1327) descreve que as fibras de polipropileno são encontradas em duas formas, conforme mostra a figura 3, em monofilamento (consistem em fios cortados em comprimento padrão) ou fibriladas (que se apresentam como uma malha de finos filamentos de seção retangular e

promovem um aumento na adesão entre fibra-matriz devido a um efeito de intertravamento).

As propriedades mais importantes para definir qual será a contribuição da fibra as propriedades mecânicas dos compósitos são: módulo de elasticidade e resistência mecânica. Fibras de polipropileno são chamadas de fibras de baixo módulo, isso por que possuem modulo de elasticidade inferior ao do compósito cimentício quando endurecido. Pode-se concluir que estas fibras somente são eficientes quando a resistência e o módulo de elasticidade do compósito cimentício também forem baixos, isto é, no estado fresco e no início de seu processo de endurecimento. Sendo assim essas fibras são utilizadas quando existe o risco de fissuração plástica. Para Silva Filho, (2003, p.68), os compósitos com adição de fibras apresentaram melhor comportamento dinâmico em relação à energia de ruptura acumulada e à energia para aparecimento da primeira fissura, aumentando assim sua capacidade de deformação antes da ruptura do compósito.

Portanto, um compósito cimentício reforçado com fibras tem como propósito minimizar limitações como: fragilidade, baixa resistência à tração e reduzida capacidade de deformação antes da ruptura. Para isso deve atentar para as características das fibras que serão incorporadas.

2.3.1 Propriedades necessárias às fibras

Segundo Casagrande (2012, p.24) o desempenho do compósito está diretamente relacionado com as propriedades encontradas nas fibras. Além da compatibilidade que a fibra e a matriz devem apresentar, no que se refere à resistência e ao módulo de elasticidade, também se faz de suma importância observar a geometria, o teor da fibra e ainda a aderência que a fibra deve apresentar com a matriz.

2.3.1.1 Geometria

O desempenho de um compósito cimentício após a fissuração depende muito da geometria da fibra. Para melhor representar essa influência, utiliza-se um parâmetro chamado de fator forma, que é obtido pela divisão do comprimento pelo diâmetro da seção transversal da fibra.

Segundo Casagrande (2010, p.24), em um concreto, por exemplo, fibras com comprimento inferior ao dobro da dimensão máxima do agregado podem sofrer o processo de arrancamento. Sendo, portanto, recomendado que essa proporção seja seguida, para garantir a compatibilidade dimensional entre os materiais. É ela que possibilita que a fibra atue como reforço no concreto e não como um reforço na argamassa, tendo em vista que a fratura se propaga na região de interface entre agregado graúdo e pasta.

O arranjo de um concreto reforçado com fibras onde há compatibilidade dimensional permite que a fibra trabalhe como ponte de transferência de tensões na fissura. Esse efeito garante a eficiência da fibra para seu propósito máximo que, é de distribuir as tensões ao longo do concreto, o mesmo não ocorre onde não se tem tal compatibilidade dimensional (CASAGRANDE, 2010, p.24).

2.3.1.2 Aderência

A aderência afeta diretamente na resistência, nas deformações e na forma da ruptura de um compósito. Perrone (2011, p.15) verificou que a múltipla fissuração em seus experimentos foi mais acentuada em amostras que não apresentaram aderência excessiva entre a fibra e a matriz. Sendo assim, para o aparecimento de uma quantidade maior de fissuras, com menor abertura, é necessário que se tenha uma boa aderência entre a fibra e a matriz, mas não em excesso, pois o excesso de aderência compromete o aproveitamento de todo potencial de reforço das fibras e diminui a ocorrência de múltipla fissuração.

2.3.1.3 Teor de fibras incorporado

A capacidade de reforço da fibra depende diretamente do teor de fibra utilizado. Sendo assim, quanto maior o teor, maior será o número de fibras atuando como ponte de transferência ao longo da fissura. Um detalhe a ser atentamente observado, é que as fibras alteram as condições de consistência e mobilidade da mistura (trabalhabilidade). Essas alterações dependem de uma série de fatores, como: material de que é feita, o teor de incorporação e a geometria da fibra. A falta de trabalhabilidade tende a ocorrer com fibras de maior comprimento, pois isto reduz a mobilidade relativa entre as partículas.

Além do comprometimento na trabalhabilidade, o alto teor de fibras pode ocasionar o aparecimento de bolhas formadas por fibras aglomeradas, que geram

um ponto fraco onde estiver localizada a bolha. Essas bolhas, definidas como ouriço por Isaia (2005, p.1350), estão associadas à dificuldade de dispersão da fibra durante a mistura.

2.3.1.4 Interação fibra-matriz no compósito

Os compósitos cimentícios apresentam uma baixa resistência à tração, logo, possuem uma grande dificuldade de interromper a propagação da fissura quando submetidos ao esforço de tração. Isso acontece pelo fato da direção de propagação das fissuras ser transversal à direção principal de tensão (FIGUEIREDO, 2005, p.1331). Cada fissura que surge reduz a área destinada a suportar a carga e assim aumenta as tensões concentradas nas extremidades das fissuras. A fissura age como um obstáculo na distribuição das tensões ao longo da estrutura, conforme representado na figura 4. Portanto, a ruptura na tração é causada por fissuras que se unem formando outra única.

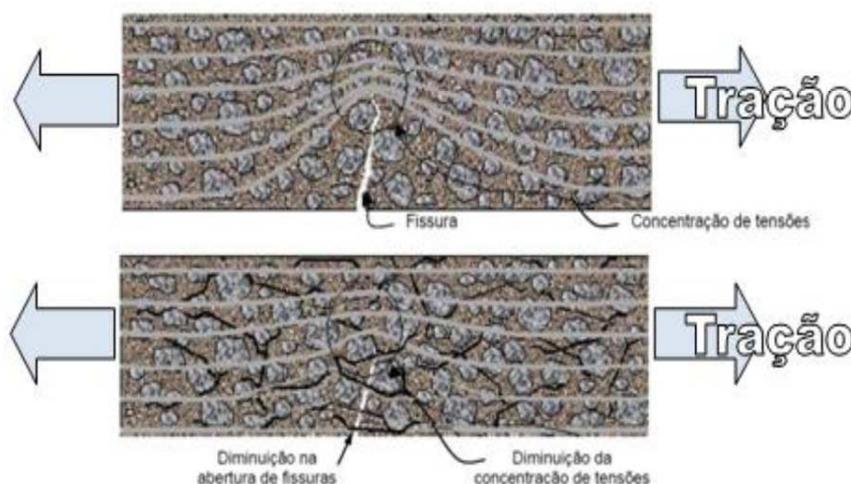


Figura 4 - Distribuição da tensão em um compósito cimentício: sem adição de fibras e com adição de fibras.

Fonte: adaptada de FIGUEIREDO, 2005, p.1332.

Para controlar o avanço da fissura, é indicado o reforço com fibras, pois estas aumentam a capacidade de absorção de energia e a resistência ao impacto. Ocasionalmente assim uma diminuição do tamanho das aberturas das fissuras (MAGALHÃES, 2010, p.1).

O uso da fibra traz consigo as seguintes vantagens (CASAGRANDE, 2012, p.25):

- Distribuem as fissuras de uma forma aleatória;

- Melhora da tenacidade à flexão (energia absorvida quando um corpo de prova é rompido à flexão);
- Ganho quanto à tenacidade na compressão (pois a fibra atua como ponte de transferência de tensões pelas fissuras);

Sendo assim, o compósito reforçado com fibras pode apresentar resistência e capacidade de deformação elevadas e melhor ductilidade, o que é um diferencial quando se trata de esforços elevados de tração.

2.4 Compósitos Cimentícios com adição de materiais pozolânicos

Metha e Monteiro (2008, p. 308) transcrevem o conceito apresentado pela NBR 12653 (ABNT, 2012) e definem o material pozolânico como sendo um material silicoso ou sílicoaluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que numa forma finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperatura ambiente para formar compósitos cimentantes.

Nogueira (2011, p.21), propõe a utilização de cinzas em matrizes cimentícias, isso porque alguns tipos de cinzas apresentam sílica (SiO_2) em sua composição e ela tende a reagir com o hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento.

Rodrigues (2010, p.193) avalia a utilização de materiais pozolânicos em substituição a certa quantidade de cimento em um compósito cimentício se justifica devido a aspectos econômicos e ambientais. Essa substituição pode variar de 20 a 70% em massa do material cimentício total.

A utilização de materiais pozolânicos produz um efeito benéfico às propriedades dos compósitos cimentícios como, por exemplo, melhor resistência à fissuração térmica, aumento da resistência à compressão final, refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição na interface entre agregado graúdo e pasta, no caso dos concretos. A combinação destes fatores, em geral, favorece que estes compósitos apresentem maior durabilidade (METHA e MONTEIRO, 2008, p. 308).

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2012), os materiais pozolânicos podem ser divididos em três classes: C, N e E. Esta classificação é definida a partir das propriedades químicas e físicas apresentadas nas tabelas 2 e 3. Além

disso, a NBR 12653 (ABNT, 2012, p.4), determina que para um material ser utilizado como pozolânico, menos de 34% deve ficar retido na peneira de 45 μ m.

Tabela 2 - Propriedades Químicas – valores expressos em porcentagem (%)

PROPRIEDADES	CLASSE DE MATERIAL POZOLÂNICO		
	N	C	E
Si O ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥70	≥70	≥50
SO ₃	≤4	≤5	≤5
Teor de umidade	≤3	≤3	≤3
Perda ao Fogo	≤10	≤6	≤6
Álcalis disponíveis Na ₂ O	≤1,5	≤1,5	≤1,5

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira n°12653, 2012.

Tabela 3 – Parâmetros Físicos – valores expressos em porcentagem (%)

PROPRIEDADES	CLASSE DE MATERIAL POZOLÂNICO		
	N	C	E
Índice de atividade Pozolânica com cimento aos 28 dias	≥75	≥75	≥75
Índice de atividade Pozolânica com cal aos 7 dias	≥6 MPa	≥6MPa	≥6MPa
Água requerida	≤115	≤110	≤110

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira n°12653, 2012.

2.4.1 Cinza volante (CV)

Segundo Aitcin (2000, p. 170), cinzas volantes são pequenas partículas residuais produzidas na geração de energia provinda da queima de carvão mineral. Podem apresentar composição química e fases diferentes de acordo com a quantidade de impurezas contidas na queima do carvão. Sendo assim, as cinzas volantes são formadas por impurezas minerais como argila, quartzo e feldspato, que são fundidas quando expostas a altas temperaturas, solidificando-se quando submetidas a temperaturas mais baixas, o que possibilita serem arrastadas por uma corrente de gás, por isso são chamadas de cinza volantes.

Fisicamente podem ser bem diferentes uma das outras, com partículas esféricas simples, granulometria similar ao do cimento Portland, ou conter algumas esferas ocas e ainda partículas angulares.

Sua adição a matrizes cimentícias é uma estratégia adotada, pois traz inúmeros benefícios as propriedades dos compósitos cimentícios, tanto no comportamento mecânico como com relação à durabilidade.

Segundo Garcez (2009, p. 85), a adição de cinza volante em um concreto reforçado com fibras ajuda a controlar a tenacidade da matriz. Como a reação pozolânica é mais lenta que a hidratação do clínquer, suaviza os ganhos de resistência e a tenacidade nas idades iniciais e resulta em ganhos de resistência nas idades mais avançadas.

Para elaboração do PPECC a adição de cinza volante é fundamental, pois além de controlar a tenacidade da matriz reduz o custo de produção do compósito, uma vez que, como nestes compósitos a concentração de cimento tende a ser elevada, ao adicionar cinza reduz-se a quantidade de cimento do traço e conseqüentemente há uma redução no custo de produção do compósito.

2.4.2 Cinza de casca de arroz (CCA)

As cinzas de casca de arroz são subprodutos da indústria beneficiadora de arroz, provenientes da queima da casca que é utilizada como fonte energética para secagem dos grãos. Em geral, são compostas por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica em base anidrida. Análises químicas mostram que quando totalmente queimadas apresentam alto teor de sílica (90 a 95%), (NETTO, 2006, P.60).

Segundo Ferreira (1999, p.29) a temperatura e tempo de queima, assim como o tempo de moagem influenciam na qualidade da CCA, pois governam o teor de sílica amorfa e a sua reatividade. A combustão tem como finalidade remover por meio de oxidação controlada a celulose e a lignina enquanto preserva a estrutura celular original da casca de arroz. A cristobalita é detectada em amostras que são submetidas a queima com temperaturas de 800°C e a área específica varia de 6 a 10m²/g. Ferreira (1999, p.32), ainda aponta para a importância do tempo de moagem para a utilização da cinza de casca de arroz, pois, há um aumento na área específica com o aumento do tempo de moagem.

2.5 Engineered Cementitious Composites (ECC) – compósito cimentício de alto desempenho

Engineered Cementitious Composites – ECC, também chamados de *High Ductility Fiber Reinforced Cementitious Composites – HDFRCC*, foram desenvolvidos como uma solução para suprir a principal deficiência dos compósitos cimentícios convencionais, a baixa resistência à tração. Na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, um grupo de estudos chamado *Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory – ACE-MRL*, se dedica a estudar sobre esse tema. O grupo de pesquisas é liderado pelo professor Victor Li. Suas pesquisas vêm desenvolvendo compósitos cimentícios que recebem uma adição máxima de 2% de fibra em relação ao volume do compósito. Para Li (2003, apud GARCEZ, 2009), os compósitos cimentícios de alta ductilidade reforçados com fibras são projetados para resistir elevadas tensões de tração e cargas de cisalhamento com o mínimo de adição de fibras no compósito. A elevada ductilidade também amplia a capacidade de absorção de energia e de deformação sob carregamento de tração, isso é resultado das múltiplas fissuras com pequenas aberturas, que são pré-requisitos desse processo, geradas no momento da ruptura desse compósito.

Garcez (2009) desenvolveu um *ECC* a partir de materiais produzidos no Brasil. Este estudo teve a colaboração do grupo de pesquisadores pertencentes ao Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e, posteriormente, estudos foram desenvolvidos com pesquisadores do Núcleo de Estudos em Materiais Compósitos – NEMC, da Universidade Federal de Pelotas – UFPel.

As características marcantes, desse compósito reforçado com fibras, são: a alta ductilidade, proporcionada ao material, e a obtenção de um compósito cimentício altamente deformável, com apenas 2% de adição de fibras; Essas características só são alcançadas devido aos princípios da micromecânica e mecânica da fratura (GARCEZ, 2009, p. 13).

A micromecânica contribui estabelecendo as relações entre o comportamento mecânico (e macroscópico dos compósitos) e as propriedades individuais de cada fase. Ou seja: a relação existente entre a fibra, a matriz e ainda a interface fibra-matriz (GARCEZ, 2009, p.14). Segundo Li (2003 apud

GARCEZ, 2009), essas combinações entre matérias primas, possibilitaram a adoção de dosagens racionais, considerando os fundamentos da mecânica da fratura, além da otimização dos compósitos (obtendo o melhor desempenho possível com o menor teor de fibras). A otimização é importante, pois reduz a quantidade de fibra tornando o compósito viável economicamente, sendo que a fibra apresenta um custo elevado.

Os *ECC* são produzidos com elevados teores de cimentos – duas ou três vezes mais do que se utiliza nos concretos convencionais – fator que também pode inviabilizar sua utilização, no que se refere ao custo. São os elevados teores de cimento que possibilitam a dispersão da fibra no compósito e permitem também o controle de tenacidade da matriz (WANG and LI, 2007).

A alta capacidade de deformação após atingir a tensão máxima de carregamento gera o comportamento chamado de *strain-hardening*, característico por transferir o carregamento entre as fibras gerando muitas fissuras de pequenas aberturas, essas múltiplas microfissuras acontecem antes da ruptura ou arrancamento das fibras; Sendo assim, no momento que a carga é transferida para a fibra que conduz a carga à matriz, surgem pequenas fissuras em diferentes pontos, a repetição dessa ação gera deformações superiores, resistência elevada e o material tende a resistir mais tempo antes de romper (CASAGRANDE, 2012, p.25).

A capacidade de escoamento e de deformar até 300 vezes mais que os compósitos cimentícios convencionais fazem com que o compósito seja também conhecido como *Strain Hardening Cementitious Composites - SHCC*, que traduzindo pode ser entendido como compósito cimentício com escoamento, isso só é possível devido à boa interação que há entre fibra e a matriz cimentícia, esse comportamento pode ser observado na figura 5 e, para melhor elucidar, a figura 6, mostra o processo de fissuração de um concreto convencional (a) e as microfissuras de pequenas aberturas de um *ECC* (b).

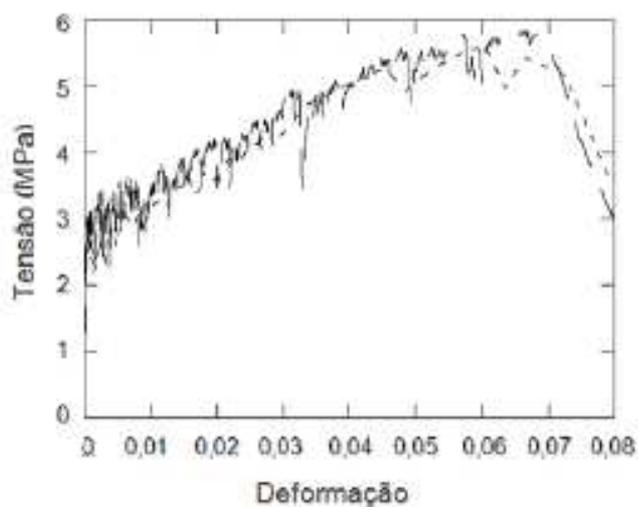


Figura 5 – Comportamento *strain-hardening* de um compósito tipo PPECC (ECC reforçado com fibras de polipropileno) sob ação de esforços de flexão.

Fonte: Li e Kanda (1998).

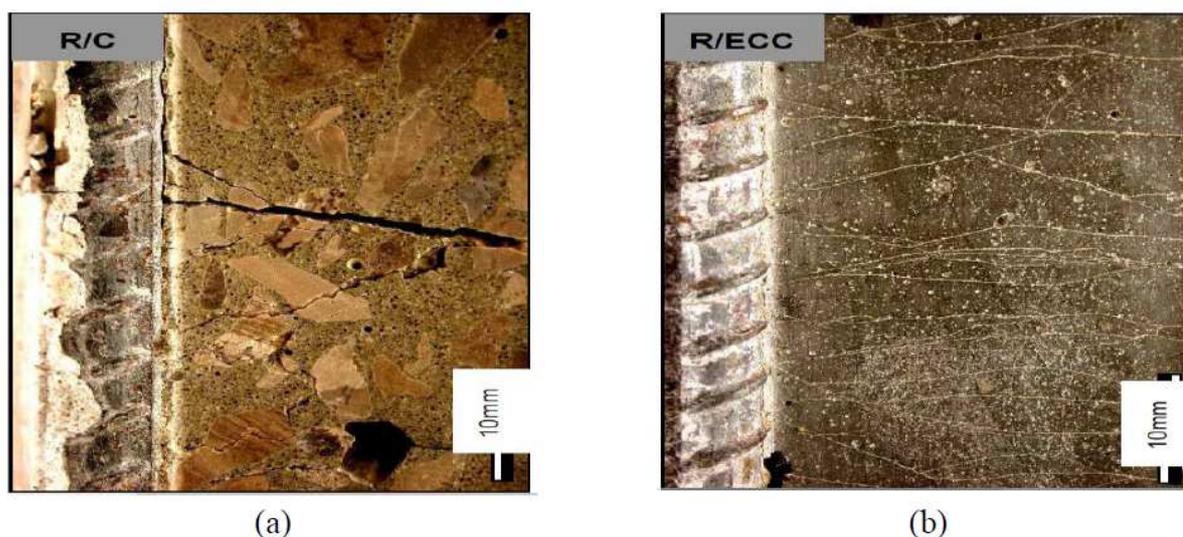


Figura 6 - Comparativo do processo de fissuração entre concreto convencional (a) e ECC (b)

Fonte: CASAGRANDE, 2012, p.28 – adaptação LI, 2003.

Como podemos observar a fibra adquire um papel muito importante para o bom desempenho do *ECC*, principalmente a interação entre fibra e a matriz cimentícia; Nas pesquisas desenvolvidas em Michigan, pelo grupo de trabalho do Professor Victor Li, a fibra utilizada que apresentou melhor desempenho com a matriz cimentícia foi à fibra de álcool polivinílico (PVA), isso porque como o *ECC* permite o controle da abertura da fissura, a fibra de PVA apresenta a estabilização da abertura com 1% de deformação.

Outro efeito que pode acontecer nos *ECC* é *self-healing*, ou seja, a capacidade de auto-cicatrização. A auto-cicatrização acontece nas primeiras idades do concreto e para acontecer é necessária a existência de compostos químicos reativos, condições ambientais específicas e por fim que haja fissuras com pequenas aberturas. Segundo Garcez (2009, p. 21), o primeiro requisito se dá com ciclos de umedecimento, que hidratam as partículas inertes que se encontram depositadas nas paredes das fissuras. Os compostos químicos reativos são o CO_2 presente no ar, adicionado à presença de anidridos (que ocorrem devido a reações químicas que deixam de ocorrer no momento da mistura devido a baixa relação água-aglomerante) e à baixa porosidade, que não permite que a hidratação do agregado hidráulico seja feita em sua totalidade, possibilitando a auto-cicatrização. Com relação a aberturas pequenas, Garcez (2009, p.21), menciona, que em estudos preliminares, aberturas inferiores a $150\mu\text{m}$ podem ocasionar o processo de auto-cicatrização, mas ela ocorre com mais facilidade em aberturas inferiores a $50\mu\text{m}$.

Seguindo os estudos desenvolvidos por Garcez (2009, p.22), que verificou a substituição da fibra de PVA por fibras de polipropileno, visando à confecção de um *ECC* com materiais disponíveis no Brasil, a proposta deste trabalho é continuar a linha de pesquisa e desenvolver um traço de *ECC* similar ao do traço proposto por Garcez (2009). Para isso, utilizou-se materiais que estão disponíveis no mercado brasileiro, em busca de uma alternativa resistente, eficiente e econômica para elaboração destes compósitos cimentícios que podem ser utilizados, por exemplo, como bases de recapeamento utilizadas na manutenção de pavimentações (rígidas ou flexíveis) rodoviárias brasileiras.

2.5.1 A importância da micromecânica para concepção de um *ECC*

O desenvolvimento de *ECC* é baseado nos conceitos de micromecânica, pois, a ductilidade elevada é resultado da combinação de um comportamento de endurecimento por deformação com o desenvolvimento de um padrão de fissuração múltipla. Estes dois fenômenos só ocorrem se houver uma propagação estável das fissuras (FUKUYAMA et al., 2000).

A propagação estável da fissura está diretamente ligada à tenacidade na ponta da trinca, que tem que ser menor que a energia complementar. A energia

complementar é calculada a partir da curva representativa da relação entre: tensão de transferência (σ) e a abertura da fissura (δ).

O diagrama apresentado na figura 7 representa a relação existente entre os materiais constituintes do compósito (fibra, matriz, interface) e determina o comportamento que os mesmos irão assumir (Li et al. 1993).

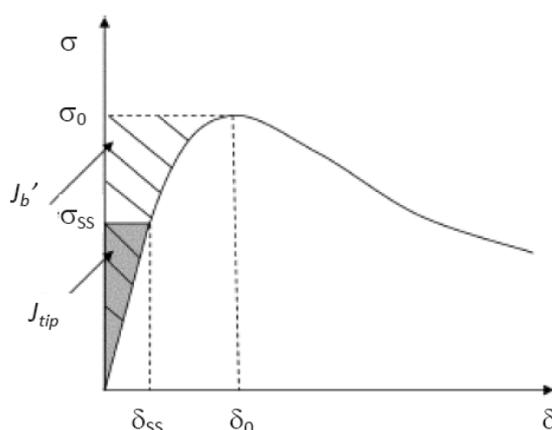


Figura 7 - Curva tensão-abertura de fissuras para um material com comportamento *strain-hardening*.

Fonte: Li, apud Garcez 2009.

Onde:

J_b energia complementar;

J_{tip} tenacidade na ponta da trinca;

σ_{ss} tensão de propagação estável da fissura;

δ_{ss} abertura da fissura relativa à tensão σ_{ss} ;

Obs.: O J_{tip} pode ser aproximado pela razão entre o quadrado da tenacidade à fratura da matriz e o módulo de elasticidade da matriz.

A importância dessa relação está em garantir que a resistência da primeira fissura não exceda a tensão máxima de transferência. Pois, se a matriz for mais resistente que a tensão tolerada pelas pontes de transferência das fibras, estas não irão conseguir suportar o carregamento após a ruptura da matriz, e isso acarretará na ruptura do compósito logo em seguida.

Sobolev, Tabatabai e Zhao (2013, p.12), avaliam a abertura das fissuras e as diferenciam em fissuras padrão (*griffith crack*), sendo aquelas com aberturas iguais ou maiores que uma polegada (considerando um corpo prismático de 15x3x1in) e fissuras planas (*Steady-state flat crack*), aquelas com aberturas inferiores a uma polegada. A figura 8 ilustra os dois tipos.

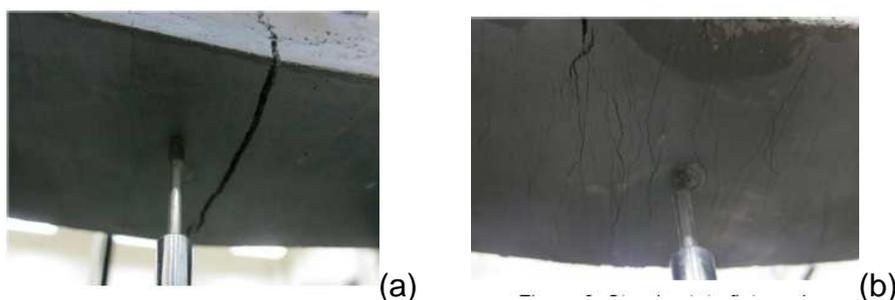


Figura 8 – Ilustração dos tipos de abertura de fissuras em *ECC* (a) fissuras padrão – abertura igual ou maior que uma polegada; (b) fissuras planas - abertura inferior a uma polegada.
 Fonte: Sobolev, 2013, p.12.

2.5.2 Comportamento individual da fibra em um ECC

As fibras utilizadas são curtas, entre 6 e 12mm, e com o diâmetro variando de 10 a 100 μ m. São distribuídas de forma aleatória dentro da matriz cimentícia.

O modelo teórico desenvolvido na Universidade de Michigan para criação de *ECC* tem como base a transferência de tensões pelas fibras. Neste modelo, quando a fibra é submetida a uma força de arrancamento, primeiramente ela sofre o processo de deslocamento da matriz adjacente e posteriormente a fibra é arrancada.

O processo de deslocamento pode ser considerado como a propagação da fissura ao longo da interface fibra-matriz. Após esse deslocamento a interface passa a ser governada por forças de atrito. Posterior ao completo deslocamento das fibras da matriz acontece o estágio de arrancamento. Nesse estágio ocorre o endurecimento por escorregamento, gerado pelas forças de atrito. Onde a fibra é contida pela a aderência de atrito entre fibra e matriz (YANG, et al. 2008).

Os compósitos reforçados com fibras, de alta ductilidade, têm como comportamento ideal um nível de saturação de fissuras, de modo que a abertura das mesmas permaneça reduzida, com o espaçamento mínimo entre as fissuras. Resultando assim em um aumento da deformação inelástica à tração do compósito e no desenvolvimento de múltiplas fissuras (WANG, 2005).

2.5.3 Compósitos com base nos materiais constituintes

O estudo da micromecânica aponta para a importância das propriedades microscópicas dos materiais para obter o comportamento final do compósito. Ela permite a correta combinação entre fibra, matriz e interface.

Um exemplo de investigação interfacial é a discussão teórica apresentada por Yang e Li (2006) referente à utilização de fibras sintéticas de polivinil álcool (PVA) e de polipropileno (PP).

Os autores desenvolveram um modelo teórico que oportunizou uma redução na utilização do volume de fibras de PVA (de 6% para 2%) através do tratamento superficial da fibra (efeito *coating*).

A figura 9 mostra o efeito *coating* no processo de arrancamento da fibra.

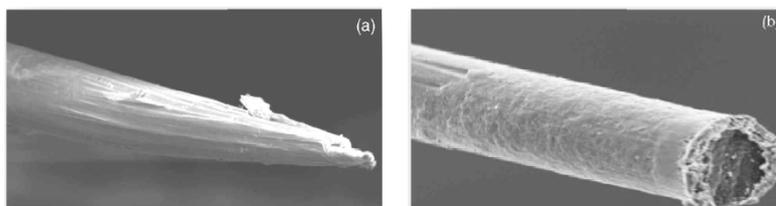


Figura 9 – Efeito *coating* no processo de arrancamento das fibras de PVA (a) Fibra sem tratamento (b) Fibra tratada superficialmente.

Fonte: Li et al. 2002.

Com relação às fibras de PP o incremento se deu na aderência de atrito, pois, as fibras de polipropileno apresentam fraca aderência a matriz cimentícia devido ao seu caráter hidrofóbico e pouca aspereza superficial.

A figura 10 mostra o desempenho de uma fibra com tratamento superficial (HTPP), comparando com a fibra de polipropileno original (PP).

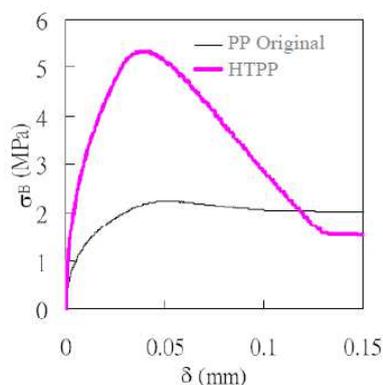


Figura 10 - Efeito da alteração da propriedade das fibras de PP na curva $\sigma - \delta$.
Fonte: Yang, 2008.

Estas análises mostram a importância da micromecânica na combinação dos materiais para que o compósito apresente seu comportamento *strain-hardening*.

2.5.4 Análise das fissuras

A ductilidade e o efeito *strain-hardening* de um ECC não dependem somente da capacidade do reforço da fibra. Segundo Wang e Li (2006) existem dois fatores relacionados à matriz que prejudicam um bom desempenho de um ECC, sendo eles os defeitos que a matriz pode apresentar e a sua tenacidade à fratura. As falhas que a matriz pode apresentar são: microfissuras induzidas por retração, falhas na transição entre fases ou ainda o tamanho dos poros.

A matriz de um ECC é considerada frágil, sendo assim, a primeira fissura que surge é determinada pelo maior defeito presente na matriz, a segunda pelo seguinte defeito de maior grandeza e assim segue até que se atinja o tamanho crítico das falhas e a energia disponível não é mais capaz de provocar o prolongamento das falhas e resulta em um dano localizado na fibra que oferece o menor ponteamto e essa passa a ser a última fissura (GARCEZ, 2009). Na figura 11 podemos observar o esquema de formação de fissuras.

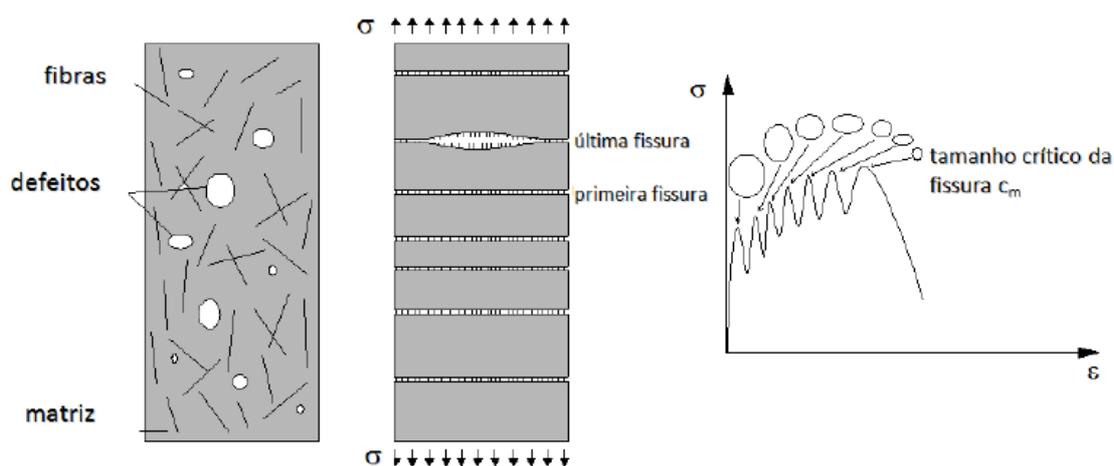


Figura 11 - Processo esquemático do processo de fissuração e gráfico tensão deformação.
Fonte: Garcez, 2009.

2.5.5 As adições de materiais pozolânicos em ECC

O ECC necessita de uma grande quantidade de cimento para permitir a dispersão da fibra na matriz, sendo assim torna-se uma solução técnica com elevado custo. Portanto a adição de materiais pozolânicos torna-se uma alternativa que visa reduzir o custo de produção de um ECC e colaborar nas questões ambientais ao dar um destino a materiais que são considerados resíduos.

No item 2.4, apresentado acima, indicamos a utilização de materiais pozolânicos em matrizes cimentícias. A cinza volante e a cinza de casca de arroz são alvo de uma série de estudos que buscam a aplicação adequada destes materiais, devido à presença de sílica em sua composição.

Os materiais pozolânicos originados das cinzas de casca de arroz são ricos em sílicas, na forma cristalina, quando sem controle no processo de queima e sílica na forma amorfa, quando passam por um controle rigoroso no processo de queima da casca. A sílica em seu estado amorfo é caracterizada por uma alta reatividade, sendo assim a forma mais desejada. A figura 12 mostra a diferença entre as cinzas que sofrem o processo de queima controlada quando comparadas a sem controle de queima.

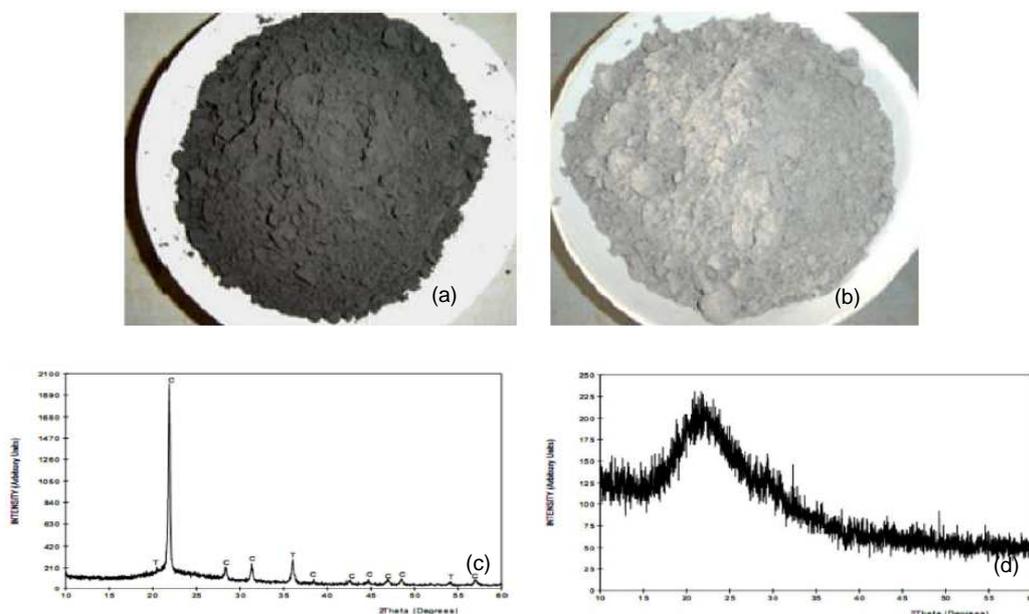


Figura 12 - Amostras de cinza de casca de arroz (a) sem controle de queima. (b) com controle de queima. (c) DRX da cinza sem controle de queima (forma cristalina). (d) DRX da cinza com controle de queima (forma amorfa).

Fonte: BARBOSA et al. 2006.

Pode-se observar que as cinzas que sofreram queima não controlada possuem coloração escura, que representa o teor de carbono residual presente na cinza. Já nos ensaios de difração de raios x é possível identificar a presença de cristais, diferente do estado amorfo.

No caso das cinzas de casca de arroz, outro fator de grande relevância é o tempo de moagem, necessário para tornar uniforme e aumentar a superfície específica da partícula. Pois quanto maior a superfície específica maior será a reatividade.

Netto (2006, p.66) apresenta as condições ideais para obtenção de material pozolânico proveniente da cinza de casca de arroz:

Estudos conduzidos com o intuito de determinar quais as condições ideais para obtenção de uma cinza de casca de arroz de alta reatividade, para produção de concretos de alto desempenho, apontam para as seguintes conclusões (MEHTA e PITT, 1977; CALLEJA, 1983; SUGITA et al., 1992; MAEDA et al., 2001, entre outros, apud SANTOS, 2006):

- a reatividade da cinza é bastante influenciada pela temperatura de queima da casca e pelo tempo de exposição a esta temperatura (tempo de retenção);
- quanto maior for a superfície específica do material, maior será sua reatividade;
- cinzas de boa qualidade podem ser obtidas com temperaturas abaixo de 800°C; e
- o resfriamento brusco da cinza pode evitar a formação de fases cristalinas.

A reatividade do material vai depender da formação, durante o processo de queima, em função de diferentes temperaturas, de proporções relativas de sílica na forma cristalina e amorfa. Quanto maior o teor da última, mais quimicamente reativo será o material, porém, não necessariamente, apresentará o melhor desempenho. (SANTOS, 2006).

Para Santos (apud NETTO, 2006) os principais fatores que interferem na qualidade do material a ser utilizado como pozolana em um concreto são a temperatura de obtenção da cinza de casca de arroz e o tempo de exposição a essa temperatura, somados à variação de superfície específica.

2.5.6 Comportamento mecânico dos ECCs

Garcez (2009, p.113) apresenta desempenho dos traços de ECC desenvolvidos visando aplicação como camada de pavimentação. Os traços por ela desenvolvidos foram ensaiados a flexão a quatro pontos, compressão e tração. Na sequência são apresentados alguns resultados encontrados em seus experimentos.

A figura 13 apresenta os gráficos tensão x deformação gerados por Garcez (2009) para os diferentes traços estudados.

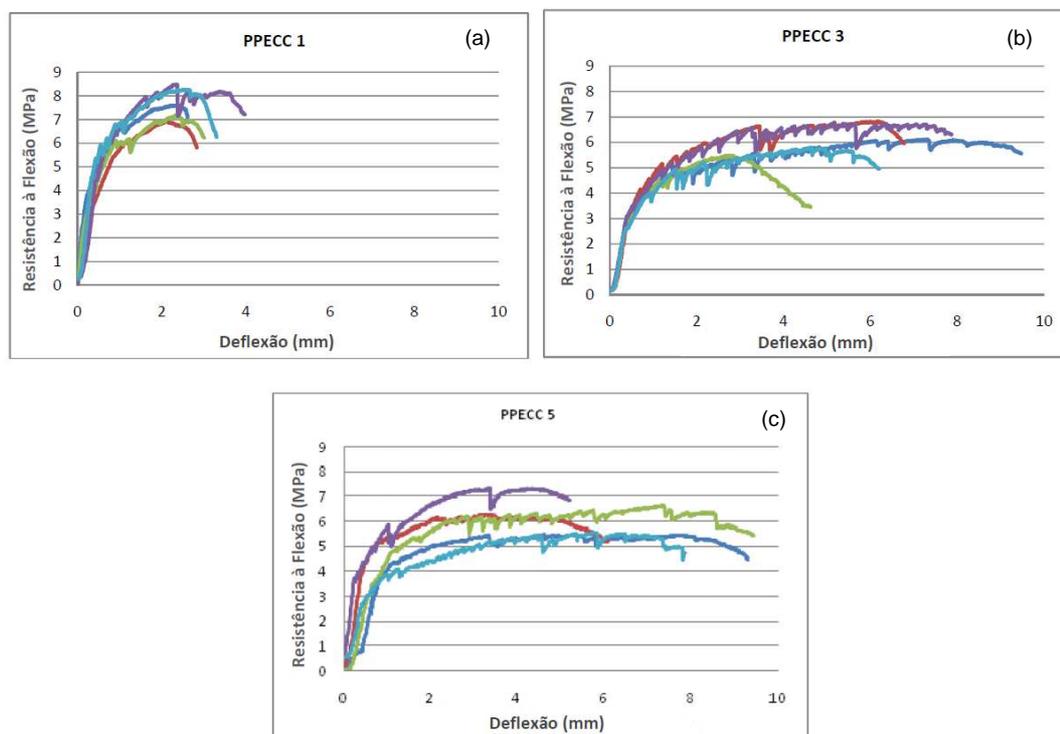


Figura 13 - Gráficos de resultados do ensaio à flexão a 4 pontos. (a) traço sem utilização de cinza volante na sua composição. (b) traço utilizando cimento, sílica e cinza volante na composição. (c) traço sem utilizar sílica em sua composição.

Fonte: Garcez, 2009.

Ainda como análise referente a esses traços, pode-se observar a interação entre fibra e matriz através da microscopia eletrônica de varredura, conforme apresentado na figura 14.

Sobre as imagens geradas pelo MEV, a autora explica que no caso do PPECC1 (figura 14-a) observa-se uma elevada aderência desenvolvida entre a matriz e a fibra, pois verifica-se que a fibra sofreu distorções em seu formato (deformou-se) e percebe-se que uma grande quantidade de matriz cimentícia fica aderida a superfície da fibra. No caso do PPECC5 as fibras continuam retilíneas, indicando o escorregamento da fibra na matriz, o processo de arrancamento e como apresentou uma menor aderência (poucas partículas aderida a fibra) não promoveu danos a estrutura da fibra. Esses traços foram desenvolvidos com cimento Portland tipo I. Ainda segundo Garcez, fica evidente que a fibra de polipropileno conseguiu exercer o papel de grampeamento das fissuras e desempenhar a função de múltiplas fissuras sem a ruptura da fibra. Já o PPECC3, que leva em seu traço sílica, cinza volante e cimento tipo V, apresenta

uma grande quantidade de partículas aderidas a fibra, não permitindo o escorregamento da fibra na matriz, levando a deformação em seu formato original. A autora acredita que este fato pode ocorrer porque o cimento tipo V apresenta partículas mais finas que reagem rapidamente e acabam por formar matrizes mais compactas (WANG and LI, 2006).

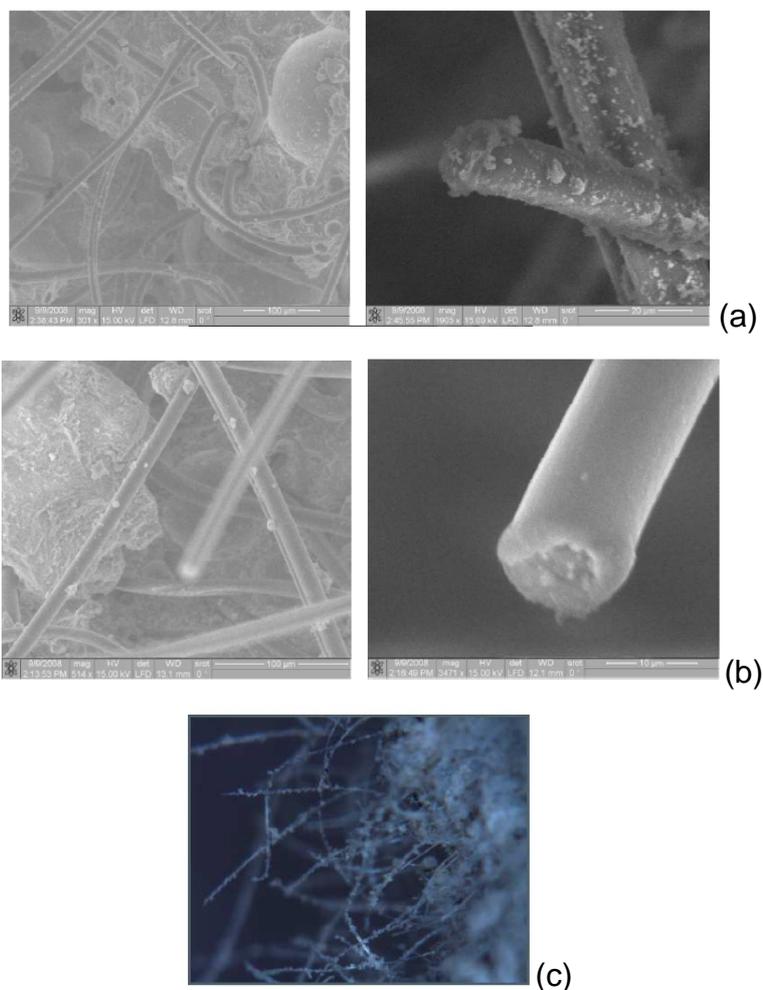


Figura 14 - Análise de microscopia eletrônica de varredura (a) PPECC1; (b) PPECC5. (c) PPECC3.

Fonte: GARCEZ, 2009.

A seção seguinte apresentará a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia aplicada no desenvolvimento do programa experimental, contemplando o planejamento necessário à realização do experimento, os materiais utilizados e suas caracterizações, a elaboração dos traços e os ensaios realizados.

A pesquisa foi desenvolvida nas dependências da Universidade Federal de Pelotas, nos laboratórios do curso de Engenharia de Materiais e do Núcleo de Estudos de Materiais Compósitos, da Engenharia Civil, além dos laboratórios conveniados ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Alguns ensaios foram possíveis devido à colaboração de pesquisadores do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e da utilização do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pelotas.

3.1 Programa experimental

Após a realização da revisão bibliográfica, que tratava da particularidade de todos os materiais que são necessários à confecção de um ECC, bem como da interação entre eles, e, tendo conhecimento dos materiais que podem ser utilizados, buscou-se aqueles disponíveis na Região Sul do Brasil. A pesquisa foi distribuída conforme mostra o esquema da figura 15. Neste esquema podem ser observadas todas as etapas necessárias ao desenvolvimento do experimento e a forma como foi concebida a estrutura do programa experimental.

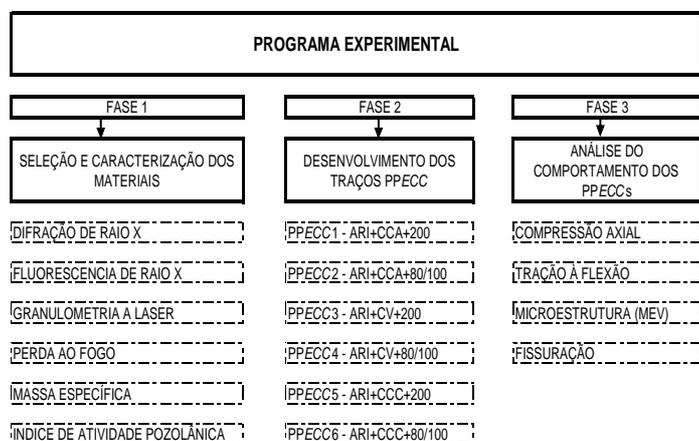


Figura 15 - Esquema de fases do programa experimental

Fonte: autora

3.2 Materiais

Na sequência são descritos os materiais utilizados, sendo eles: cimento, material pozolânico, areia silicosa, fibra de polipropileno, água e aditivo.

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado na produção dos diferentes compósitos neste trabalho foi o CP V - ARI RS, fabricado pela empresa CIMPOR e em conformidade com o especificado na NBR 5733 (ABNT, 1991). Para caracterização do cimento, foram realizados os seguintes ensaios, cujos resultados encontram-se nas tabelas 4 e 5:

- Massa específica: de acordo com a NM 52 (ABNT, 2009);
- Massa unitária: de acordo com a NM 45 (ABNT, 2006);
- EDX (espectrômetro de fluorescência de raios X).

Tabela 4- Caracterização química do cimento CP V ARI RS, obtida através do espectrômetro de raios X.

CIMENTO CP V - ARI RS	
Composição química	%
CaO	66.170
SiO ₂	15.883
Al ₂ O ₃	8.893
Fe ₂ O ₃	4.308
SO ₃	2.378
K ₂ O	1.664
TiO ₂	0.385
MnO	0.178
SrO	0.081
ZnO	0.026
ZrO ₂	0.025
Y ₂ O ₃	0.009

Fonte: Ensaio realizado com equipamento da marca SHIMADZU, EDX SERIES-720/800HS/900HS. Laboratório de Engenharia dos Materiais - UFPel.

Tabela 5- Ensaios de massa específica e unitária para o cimento CP V ARI RS.

	UNIDADE	CPV ARI RS
MASSA ESPECÍFICA	g/cm ³	2,67
MASSA UNITÁRIA	g/cm ³	0,76

Fonte: Ensaio realizado conforme ABNT NM 45 (ABNT, 2006) e 52 (ABNT, 2009), utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier.

3.2.2 Materiais pozolânicos

Nesta pesquisa, optou-se por avaliar a possibilidade de utilizar materiais pozolânicos disponíveis na Região Sul do país para desenvolver os traços de PPECC. Foram utilizados três tipos de materiais pozolânicos, sendo eles:

- Cinza volante (CV): A cinza volante foi concedida pela Usina de Termoelétrica da CGTEE (Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica), situada na cidade de Candiota-RS.
- Cinza de casca de arroz proveniente da queima da casca do arroz sem controle de tempo e temperatura de queima da casca (CCA): A cinza de casca de arroz sem controle no processo de queima foi fornecida pela empresa Josapar S.A., situada em Pelotas. O processo de combustão é por forno tipo leito fluidizado, com temperatura de queima que pode chegar até 850°C; o tempo de residência do material no forno não é controlado.
- Cinza de casca de arroz produzida industrialmente, com queima controlada (CCC): A cinza de casca de arroz com queima controlada é produzida comercialmente pela empresa Pilecco Nobre. O sistema de combustão com leito fluidizado, que devido ao sistema de automação permite o controle de temperatura de queima e a extração da sílica de casca de arroz no seu estado amorfo.

3.2.2.1 Composição química

Para identificar os compostos químicos presentes em cada amostra de material pozolânico foram realizados ensaios de fluorescência de raios X, cujos dados obtidos encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização química dos materiais pozolânicos, obtida através do espectrômetro de raios X.

Cv - Cinza volante		CCA - Cinza de casca de arroz sem controle de queima		CCC - Cinza com queima controlada	
Composição	%	Composição	%	Composição	%
SiO ₂	58.685	SiO ₂	84.903	SiO ₂	95.809
Al ₂ O ₃	24.033	CaO	5.035	K ₂ O	2.744
Fe ₂ O ₃	10.419	K ₂ O	4.057	CaO	0.748
K ₂ O	2.897	P ₂ O ₅	2.627	MnO	0.576
CaO	2.144	Fe ₂ O ₃	2.051	Fe ₂ O ₃	0.098
TiO ₂	1.080	SO ₃	0.624	Rb ₂ O	0.014
BaO	0.344	MnO	0.543	ZnO	0.011
Tm ₂ O ₃	0.121	ZnO	0.076		
ZrO ₂	0.091	Br	0.027		
MnO	0.070	Rb ₂ O	0.023		
SrO	0.039	CuO	0.022		
Rb ₂ O	0.038	SrO	0.008		
ZnO	0.023	PtO ₂	0.004		
Y ₂ O ₃	0.017				

Fonte: Ensaio realizado com equipamento da marca SHIMADZU, EDX SERIES-720/800HS/900HS. Laboratório de Engenharia dos Materiais - UFPel.

3.2.2.2 Granulometria a laser

A CCA é um resíduo industrial que atualmente não é aproveitado com fins industriais, diferente da CCC e da CV, sendo assim a CCA sem controle de queima foi submetida a processo de moagem visando uniformidade na granulometria e na forma da partícula. Utilizou-se um jarro de bolas cerâmico, tipo SL-34, com potencia de 1500W, diâmetro de 13cm e comprimento de 20cm. A proporção em peso de cinza para de bolas foi de 300 gramas de cinza para 900 gramas de esferas (1:3) e a moagem foi realizada a seco. Foram analisados quatro tempos de moagem: 60 minutos, 120 minutos, 180 minutos e 240 minutos. Após foram extraídas amostras de material para cada tempo de moagem e foi enviado para análise de granulometria a laser.

A tabela 7 mostra os diâmetros médios da CCA, de acordo com os tempos de moagem. Na tabela 8 podem ser observadas as superfícies específicas, de acordo com os tempos de moagem.

Tabela 7 - Diâmetro médio das partículas de CCA de acordo com o tempo de moagem.

GRANULOMETRIA A LASER					
CCA					
		Tempo de moagem (minutos)			
	SEM MOAGEM	60	120	180	240
DIÂMETRO MÉDIO (μm)	52,89	34,24	27,07	24,57	16,86
% REDUÇÃO (DIÂMETRO X TEMPO DE MOAGEM)		35%	21%	9%	31%

Fonte: Ensaio realizado no equipamento chamado de granulômetro, da marca CILAS, modelo 1064, do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS.

Tabela 8 - Superfície específica das partículas de CCA de acordo com o tempo de moagem.

SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm^2/g)				
CCA				
		Tempo moagem (minutos)		
SEM MOAGEM	60	120	180	240
4280,63	3475,45	3856,24	5705,75	10892,97
% AUMENTO NA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA	-20%	+10%	+48%	+91%

Fonte: Ensaio realizado no equipamento chamado de granulômetro, da marca CILAS, modelo 1064, realizado do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS.

Após a verificação do diâmetro médio das partículas, observou-se que a diferença entre a moagem a 120min e a 180min não ultrapassava aos 9% de redução no diâmetro. Da mesma forma, o aumento de 10% na superfície específica, com mais 60min de moagem poderia demandar uma maior quantidade de água ou aditivo. Outro fator importante na escolha do tempo de moagem foi à energia despendida para produzir à quantidade de material necessária a realização do experimento. Por se tratar de um material extremamente leve necessitava-se de um grande número de moagens para se alcançar o volume de material preciso, isso gerando um grande consumo de energia. Sendo assim, optou-se por utilizar a CCA moída a 120min que apresentou partículas médias de 27,07 μm .

Os resultados do ensaio de granulometria a laser de todos os materiais escolhidos podem ser verificados na tabela 9.

Tabela 9 - Granulometria a laser dos materiais pozolânicos.

GRANULOMETRIA A LASER			
DIÂMETRO MÉDIO (μm)	Material pozolânico		
	CV	CCA (120)	CCC
	48,23	27,07	11,06

Fonte: Ensaio realizado no equipamento chamado de granulômetro, da marca CILAS, modelo 1064, realizado do Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS.

Como podemos observar a CV apresenta diâmetro médio superior ao recomendado por norma (ABNT NBR 12653/12) e foi utilizada como recebida, sem moagem adicional. Tanto a CCC quanto a CCA (após a moagem pelo período de 120min) apresentaram o diâmetro de partícula máximo recomendado por norma para utilização como material pozolânico.

3.2.2.3 Massa específica e unitária

Na tabela 10 são apresentadas as massas específicas e unitárias dos materiais pozolânicos utilizados, de acordo com os ensaios realizados conforme a NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009).

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de massa específica e unitária para os materiais pozolânicos.

	UNIDADE	CV	CCA	CCC
MASSA ESPECÍFICA	g/cm^3	1,81	1,59	1,98
MASSA UNITÁRIA	g/cm^3	0,77	0,47	0,46

Fonte: Ensaio realizado conforme ABNT NM 45 (ABNT, 2006) e 52 (ABNT, 2009), utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier.

3.2.2.4 Índice de atividade pozolânica

Foram determinados os índices de atividade pozolânica através de ensaios conforme a NBR 5751 (ABNT, 2012) para determinação da atividade pozolânica com cal e NBR 5752 (ABNT, 2012) para a determinação da atividade pozolânica com cimento Portland.

O ensaio para determinação do índice de atividade pozolânica com a cal é uma medida direta do grau de pozolanicidade realizado através da determinação da resistência à compressão simples de corpos-de-prova de argamassas preparadas com o material em estudo (cal, areia e água). A pozolanicidade é dada pela média de resistência à compressão, em MPa, de três exemplares,

sendo que a NBR 12653 (ABNT, 2012) prescreve valores iguais ou superiores a 6,00MPa aos 7 dias para a resistência obtida nos corpos de prova ensaiados.

O ensaio para a determinação do índice de atividade pozolânica com o cimento Portland consiste na execução de duas argamassas: a primeira com traço de cimento e areia normal e a segunda em que uma porcentagem de cimento utilizado é substituída pelo material pozolânico. São moldados três corpos-de-prova, seguindo as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 1997) para cada argamassa. O índice de atividade pozolânica é a razão entre a resistência à compressão axial média dos corpos de prova da argamassa que leva o material pozolânico e a resistência à compressão axial média dos corpos de prova da argamassa sem material pozolânico. A resistência é apresentada em MPa e expressa em valor percentual. A NBR 12653 (ABNT, 2012) prescreve para a argamassa com materiais pozolânicos valores iguais ou superiores a 75% da argamassa convencional, aos 28 dias.

Os resultados dos índices de atividade pozolânica com cal e cimento Portland são mostrados na tabela 11.

Tabela 11 - Índices de atividade pozolânica com cal e cimento

ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA		
	NBR 5751	NBR 5752
MATERIAL	Mpa	%
CV	1,79	39
CCA	6,00	75
CCC	6,06	94,3

Fonte: Ensaio conforme ABNT, NBR 5751 (ABNT, 2012) e 5752 (ABNT, 2012), realizado no Laboratório do Núcleo de Estudos de Materiais Compósitos da UFPel.

3.2.2.5 Perda ao fogo

Visando determinar a perda de massa após uma queima controlada, as amostras de cinzas foram queimadas a uma temperatura de 800°C por o período de 120min. A perda ao fogo dos materiais pozolânicos utilizados, mostrada na tabela 12, indica o teor de carbono presente nas amostras de cinzas. O procedimento utilizado seguiu as recomendações da NBR NM 18 (ABNT, 2012).

Tabela 12 - Ensaio de perda ao fogo dos materiais pozolânicos.

PERDA AO FOGO	
MATERIAL	%
CV	3,31
CCA	21,99
CCC	3,41

Fonte: Ensaio realizado no laboratório de Engenharia dos Materiais da UFPel, utilizando forno de Mufla à temperatura de 800°C.

3.2.2.6 Classificação de acordo com propriedades físicas e químicas:

A NBR 12653 (ABNT, 2012) fixa as condições exigíveis para materiais pozolânicos para uso como adição, onde são desejadas ações aglomerantes. Esta norma classifica os materiais pozolânicos segundo três classes (Classe N, Classe C e Classe E). Essa classificação se dá em função da sua origem. Os materiais pozolânicos da Classe N são as pozolanas naturais e artificiais que obedecem aos requisitos aplicáveis na NBR 12653 (ABNT, 2012), como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico, ácido, “*cherts*”, silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas. Os da Classe C são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas que também obedecem os requisitos apresentados na normativa. Por último o material da Classe E é qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores, conforme estabelecido na mesma NBR (ABNT 12653, 2012).

Ainda, segundo a mesma NBR, os materiais pozolânicos devem estar em conformidade com as exigências químicas e físicas estabelecidas na tabela 13, que mostra também os resultados dos ensaios realizados para determinação de cada uma delas.

Tabela 13 – Exigências químicas e físicas segundo a NBR 12653 (ABNT, 2012).

PARÂMETRO	%	CLASSE N	CLASSE C	CLASSE E	CV	CCA	CCC
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	≥	70	70	50	93,14	86,95	98,91
SO ₃	≤	4	5	5	-	0,65	-
TEOR DE UMIDADE	≤	3	3	3	1	1,5	1
PERDA AO FOGO	≤	10	6	6	3,31	21,99	3,41
ÁLCALIS DISPONÍVEIS EM Na ₂ O*	≤	1,5	1,5	1,5	1,98	2,78	1,88
MATERIAL RETIDO NA PENEIRA 45µm	≤	34	34	34	37,08	32,53	22,45
IAP COM CIMENTO AOS 28 DIAS	≥	75	75	75	39	75	94,3
IAP COM CAL 7 AOS DIAS	≥	6	6	6	1,79	6	6,06

* $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,685 \text{K}_2\text{O}$, fórmula apresentada por Lucca, 2010, p.36.

Fonte: adaptada da NBR 12653 (ABNT, 2012).

3.2.2.7 Difração de raios X (DRX)

Para avaliar a existência de fase cristalina nos diferentes materiais pozolânicos foi executado o ensaio de difração de raios X. A figura 16 mostra os difratogramas para a CCC, CCA e CV.

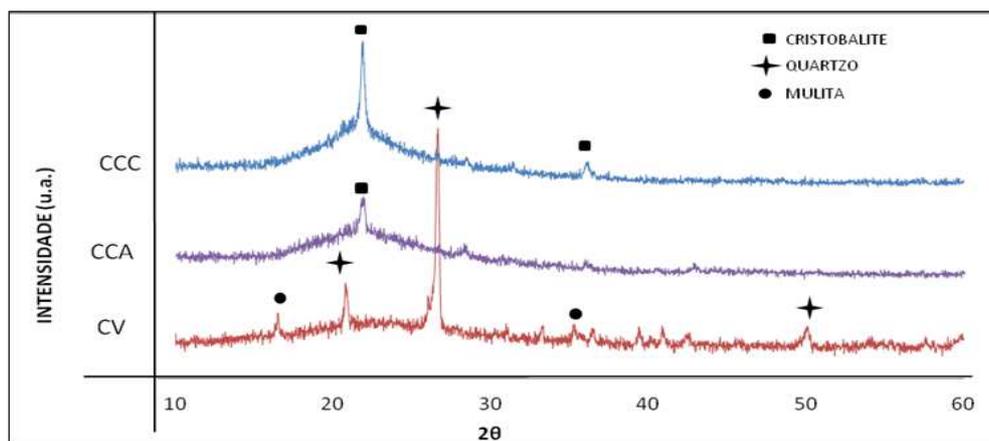


Figura 16 - Difratogramas para a CV, CCA e CCC – Difratorômetro, marca SHIMADZU, modelo XDR 6000, com intervalo de medida na faixa de 10° a 60° de 2θ e passo a cada um segundo de 0,02°.

Fonte: autora.

Podemos observar, analisando a partir da figura 16, que os materiais analisados por difração de raios X apresentam picos cristalinos de SiO₂, identificando que o material não é totalmente amorfo. As amostras CCC e CCA

apresentam picos de SiO₂ (cristobalita PDF 77-1317). A amostra de CV apresenta picos cristalinos das estruturas mulita (PDF 82-0037) e quartzo (PDF 83-0539) para SiO₂.

3.2.3 Agregado Miúdo

Os agregados utilizados em *ECC* possuem uma característica distinta dos demais materiais que constituem o traço do compósito. Eles não têm a função de reagir quimicamente, mas sim de proporcionar uma melhor distribuição granulométrica, influenciando assim, na porosidade, na absorção de água, na resistência à compressão e no módulo de elasticidade. O tipo de influência do agregado no compósito depende da composição mineralógica da rocha que o origina, dos processos que envolvem sua formação e da forma como foi processado até se tornar agregado.

Foi utilizado agregado miúdo comercializado pela empresa Mineração Jundu LTDA, que forneceu tipos de areia: areia quartzosa #80/100, com partículas apresentando tamanho médio de 150µm, com características apresentadas na tabela 14 e sílica moída #200, com partículas de dimensão na ordem de 75µm, com características apresentadas na tabela 15.

Tabela 14 - Propriedades da areia quartzosa #80/100.

AREIA #80/100				
PENEIRA (ASTM)	ABERTURA (μm)	% RETIDA MÍNIMO	% RETIDA MÁXIMO	% RETIDA ACUMULADA
# 18	-	0.0	0.0	0.0
# 20	850	0.0	0.0	0.0
# 30	600	0.0	0.0	0.0
# 40	425	0.0	0.5	0.1
# 50	300	0.0	1.0	0.2
# 70	212	0.0	4.0	1.5
# 100	150	19.0	48.0	33.7
# 140	106	44.0	75.0	59.5
# 200	75	0.0	9.0	4.6
# 270	53	0.0	1.0	0.5
		MÍNIMO	MÁXIMO	TÍPICO
Fundo		0.0	0.0	0.0
Módulo finura		80.0	100.0	91.4
Argila AFS		0.000	0.150	0.120
Umidade		0.000	0.200	0.040
pH		5.000	7.000	5.500
Finos		0.0	10.0	5.1
Temperatura		0.0	40.0 °C	25.0°C
Perda ao Fogo		0.000	0.250	0.090
Teor de SiO₂		99.000	-	99.580

Fonte: Caracterização fornecida pelo fabricante.

Tabela 15 - Propriedades sílica moída #200 da empresa Mineradora Jundu LTDA.

SÍLICA MOÍDA #200				
PENEIRA (ASTM)	ABERTURA (μm)	MÍNIMO	MÁXIMO	TÍPICO
# 200	75	0.0	14.0	
Umidade		0.000	0.200	0.100
Temperatura		0.0	40.0	25.0
Perda ao Fogo		0.000	0.630	0.110
Teor de SiO₂		99000		99680
Teor de Fe₂O₃		0.000	0.050	0.042
Teor de Al₂O₃		0.000	0.250	0.200
Teor de TiO₂		0.000	0.035	0.020

OBS:

Caracterização química: realizada por meio de fluorescência de raios-X;

Determinação granulométrica: o vácuo – ALPINE.

Fonte: Caracterização fornecida pelo fabricante.

A tabela 16 mostra a composição química das areias quartzosas e das sílicas moídas. Os resultados dos ensaios de massa específica e unitária, realizados segundo a NM 45 (ABNT, 2006) e NM 52 (ABNT, 2009), são mostrados na tabela 17.

Tabela 16 - Composição química, dos agregados miúdos, obtida através de espectrômetro de fluorescência de raios x.

AREIA QUARTZOSA #80/100		SILICA MOÍDA #200	
Composição	%	Composição	%
SiO ₂	96.947	SiO ₂	99.701
Al ₂ O ₃	1.917	K ₂ O	0.192
Fe ₂ O ₃	0.606	Sm ₂ O ₃	0.096
SO ₃	0.285	ZrO ₂	0.011
TiO ₂	0.138		
Sm ₂ O ₃	0.106		

Fonte: Ensaio realizado com equipamento da marca SHIMADZU, EDX SERIES-720/800HS/900HS. Laboratório de Engenharia dos Materiais - UFPel.

Tabela 17 - Resultados dos ensaios de massa específica e unitária da areia quartzosa e da sílica moída.

	UNIDADE	#80/100	#200
MASSA ESPECÍFICA	g/cm ³	2,17	2,03
MASSA UNITÁRIA	g/cm ³	1,46	1,07

Fonte: Ensaio realizado conforme ABNT NM 45 e 52, utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier

3.2.4 Fibra de polipropileno

A fibra de polipropileno, comercializada pela Brasilit-Saint Gobain foi a mesma utilizada por Garcez (2009, p.80) e Casagrande (2012, p.34), e apresenta as características listadas na tabela 18. O baixo custo, características específicas geradas pelo tipo de cadeia polimérica – que influencia diretamente na resistência e no comportamento, e o resultado satisfatório com a utilização de apenas 2% de volume de fibra, são fatores que garantem à fibra de polipropileno sua larga utilização nos estudos que tratam sobre ECC e foram decisivos na escolha da fibra a ser utilizada neste trabalho.

Tabela 18 - Propriedades das fibras de polipropileno.

PROPRIEDADES		
	UNIDADE	VALOR
DENSIDADE	g/cm ³	0,91
COMPRIMENTO	mm	10
DIÂMETRO	µm	12
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	MPa	850
ELONGAMENTO NA RUPTURA	%	21
MÓDULO DE ELASTICIDADE	GPa	6
RESISTÊNCIA À ÁLCALIS	-	EXCELENTE

Fonte: Garcez (2009, p.87).

3.2.5 Aditivo

A escolha do aditivo superplastificante se baseou nos resultados dos experimentos desenvolvidos por Perrone (2011, p.7). Optou-se por utilizar o Glenium 54, fornecido pela empresa BASF S/A, com base de éter policarboxílico, visando reduzir a tensão superficial da água e aumentar a fluidez do compósito proporcionando redução no teor de água sem gerar perda na consistência.

3.2.6 Água

A água utilizada foi fornecida pela empresa de abastecimento de água potável local (Sistema Autônomo de Abastecimento de água de Pelotas - SANEP).

3.3 Produção dos PPECC

3.3.1 Traços de PPECC

Os traços utilizados para moldagem dos PPECC partiram dos desenvolvidos por Casagrande (2012, p.38), e mostrados na tabela 19. A quantidade de fibra refere-se a 2% do volume total do compósito (em g/cm³). Com relação ao aditivo, o valor de 2% é sobre o volume de cimento (g/cm³), valor máximo indicado pelo fabricante do produto.

Tabela 19 - Proporção dos materiais utilizados nos traços de PPECC.

CIMENTO	MATERIAL POZOLÂNICO	AGREGADO MIÚDO	FIBRA	ADITIVO	ÁGUA
1	0,40	0,43	2%	2%	0,40

Fonte: autora.

A tabela 20 mostra as combinações de materiais utilizados nos traços de PPECC.

Tabela 20 - Combinações de materiais utilizados nos traços de PPECC.

TRAÇO	CIMENTO	MATERIAL POZOLANICO	AGREGADO MIÚDO	FIBRA	ADITIVO	ÁGUA
PPECC1	CPV-ARIRS	CCA	#200	PP	GLENIUM 54	POTÁVEL FORNECIDA PELO SANEP
PPECC2	CPV-ARIRS	CCA	#80/100	PP	GLENIUM 54	
PPECC3	CPV-ARIRS	CV	#200	PP	GLENIUM 54	
PPECC4	CPV-ARIRS	CV	#80/100	PP	GLENIUM 54	
PPECC5	CPV-ARIRS	CCC	#200	PP	GLENIUM 54	
PPECC6	CPV-ARIRS	CCC	#80/100	PP	GLENIUM 54	

Fonte: autora.

Na tabela 21 podem ser observadas a quantidade de material necessária para a fabricação de 1.700 cm³ de um traço de PPECC. Esse volume produz três corpos de prova cilíndricos (com Ø50mmx100mm) e três placas prismáticas (com 300x70x15mm).

Tabela 21 - Quantidades de material, em peso (g), utilizadas nos diferentes traços para fabricação de 1.700 cm³ PPECC.

COMPÓSITO	CIMENTO	AREIA	MATERIAL POZOLÂNICO	ÁGUA	ADITIVO	FIBRA
PPECC1 ARI+CCA+200	1.378,20	834,40	340,90	534,20	27,70	30,60
PPECC2 ARI+CCA+80/100	1.290,21	1.065,78	319,15	500,16	25,80	30,30
PPECC3 ARI+CV+200	1.308,21	785,82	527,01	507,07	26,17	30,60
PPECC4 ARI+CV+80/100	1.228,58	1.008,95	494,93	476,20	24,57	30,60
PPECC5 ARI+CCC+200	1.420,106	853,02	343,70	550,43	28,40	30,60
PPECC6 ARI+CCC+80/100	1.326,74	1089,56	321,11	514,25	26,53	30,60

Fonte: autora

3.3.2 Moldagem e cura dos PPECC

A moldagem seguiu a metodologia proposta por Casagrande (2012, p.39) e Perrone (2011, p.8). Primeiramente eram colocados em um misturador mecânico planetário, especial para argamassas, os materiais secos, de acordo com a seguinte ordem: areia quartzosa (ou sílica moída), material pozolânico e cimento. Após a homogeneização dos materiais secos, acrescentava-se uma parcela da água mais o aditivo e misturava-se por 2 minutos. Em seguida era adicionada a fibra, manualmente. Após misturava-se por mais 5 minutos. A mistura era utilizada para moldagem dos corpos de prova. Uma mesa vibratória era utilizada para garantir a qualidade na moldagem dos corpos de prova. Os corpos de prova após serem desmoldados eram mantidos submersos em água, conforme a NBR 9479 (ABNT,2006), até o momento dos ensaios.

As figuras 17 a 22 mostram a sequência de atividades realizadas para a moldagem dos corpos de prova.



Figura 17 - Separação dos materiais, por peso.

Fonte: autora.



Figura 18 - Homogeneização dos materiais secos.

Fonte: autora.



Figura 19 - Inserção de água e aditivo com mistura por dois minutos para obtenção de uma pasta com textura plástica e homogênea e inserção das fibras de PP com mistura por 5 minutos.
Fonte: autora.



Figura 20 - Moldagem dos nove corpos de provas cilíndricos, seguindo a NBR 7215 (ABNT, 1997) e nove corpos de provas prismáticos, seguindo a ASTM C 78-02 (ASTM, 2002).
Fonte: autora.



Figura 21 - Utilização da mesa vibratória para a finalização da moldagem
Fonte: autora.



Figura 22 - Desmoldagem após 24 horas para posterior cura em tanque de água até serem submetidos aos ensaios.

Fonte: autora.

3.4 Ensaios para determinação das propriedades mecânicas dos PPECC

3.4.1 Compressão axial - NBR 7215 (ABNT, 1997)

Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos com as dimensões de 50x100mm. O capeamento foi realizado com camada de enxofre, para garantir a planicidade das bases. Foram rompidos três corpos de prova para cada traço com as idades de 56 e 91 dias.

3.4.2 Tração na flexão - ASTM C 78-02 (ASTM, 2002)

Os corpos de prova para o ensaio de tração na flexão foram moldados em formas metálicas com as dimensões de 300mm x 70mm x 1,5mm e os ensaios foram realizados aos 56 e 91 dias. Os prismas foram ensaiados à flexão em quatro pontos, e receberam carregamento conforme mostrado na figura 23.



Figura 23 - Ensaio de flexão a quatro pontos.

Fonte: autora.

A carga foi aplicada em dois pontos dentro do terço médio do vão. A distância entre os apoios inferiores era de 240mm e a distância entre os pontos

de aplicação de carga era de 70mm. A taxa de carregamento adotada, segundo a norma - ASTM C 78-02 (ASTM, 2002), podia variar de 0,86 a 1,21 MPa/min, sendo assim optou-se por utilizar 1,21 MPa/min.

A figura 24 mostra o esquema utilizado no ensaio, conforme prescrito pela norma ASTM C 78-02 (ASTM, 2002).

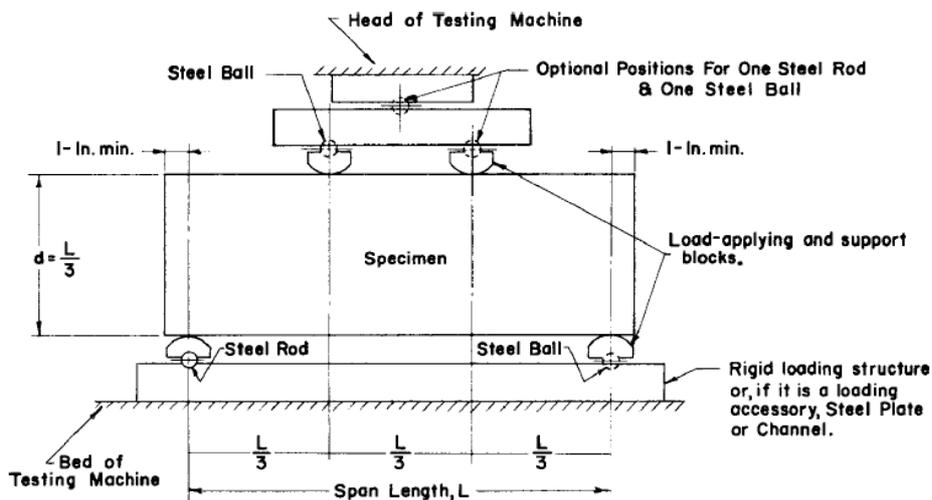


Figura 24 - Esquemática do ensaio de flexão.

Fonte: ASTM C 78-02 (ASTM, 2002, p.2.)

3.4.2.1 Determinação do módulo de ruptura

O módulo de ruptura foi calculado avaliando o início da fissura de ruptura. Chama-se de fissura de ruptura a fissura que leva o corpo a não apresentar mais resistência. De acordo com a norma ASTM C 78-02 (ASTM, 2002), quando a fissura de ruptura se apresenta no terço médio utiliza-se a equação (1); Já quando a fissura se apresenta fora do terço médio, não excedendo 5% do comprimento do vão, utiliza-se a equação (2). Desta forma, se o vão mede 240mm, 5% do vão mede 12mm, portanto, a fissura de ruptura poderia estar afastada da marcação dos terços médios somente 12mm. Nestes casos e nos casos que as fissuras excedam os 5% do comprimento do vão a amostra deve ser descartada.

$$R = PL/bd^2 \quad (1)$$

$$R = 3Pa/bd^2 \quad (2)$$

Sendo :

R = módulo de ruptura, em MPa;

P = carga máxima aplicada indicada pela máquina de teste, em N;

L = comprimento do vão, em mm;

b = largura média da amostra, em mm;

d = profundidade da amostra, em mm;

a = a distância entre a fissura principal e o terço médio mais próximo a ela, em mm, lembrando que essa distância não pode ultrapassar 5% do comprimento do vão (L).

A figura 25 apresenta exemplos de fissuras geradas após a ruptura do corpo de prova no ensaio de tração na flexão.

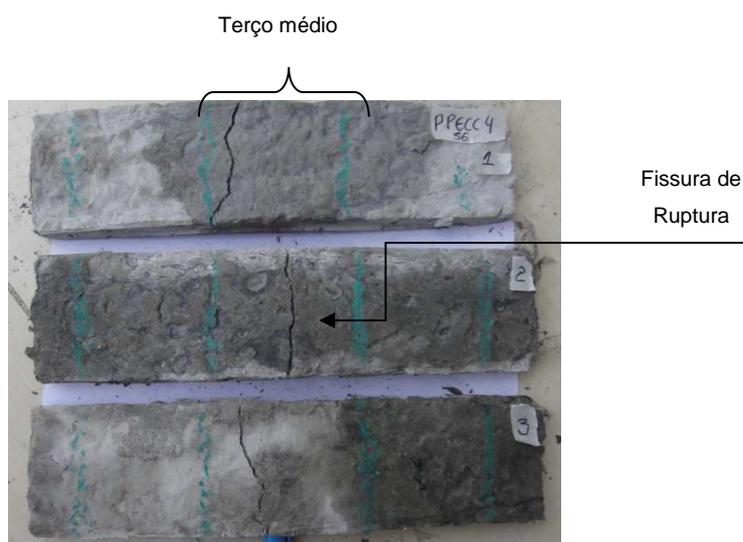


Figura 25 - Exemplos de fissuras geradas após a ruptura do corpo de prova no ensaio de tração na flexão.

Fonte: autora.

3.5 Fissuração

O controle de fissuração foi realizado visualmente após o término dos ensaios de tração na flexão, com o intuito de verificar a multifissuração, ou seja, a combinação entre os efeitos de ancoragem e escorregamento das fibras. Buscou-se identificar o grampeamento das fissuras pela fibra, permitindo assim o desenvolvimento de múltiplas fissuras sem ruptura das fibras, gerando um compósito deformável. Foram quantificadas as fissuras totais e as fissuras que se desenvolveram somente dentro do terço médio.

3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com o intuito de caracterizar a microestrutura dos PPECC e verificar a aderência da fibra de PP à matriz cimentícia, foram avaliadas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Garcez (2009, p.89) demonstrou que quanto mais intensa a aderência da fibra a matriz a forma de ruptura da ligação

fibra-matriz podia ser alterada. Este fenômeno pode ser identificado pela microscopia eletrônica de varredura nos fragmentos extraídos das placas após ensaiadas a flexão.

A partir das imagens por MEV foi possível analisar tanto o aspecto morfológico dos compósitos, quanto a aderência da fibra à matriz após a ruptura do compósito. Devido ao grande número de traços, escolheram-se somente seis para fazer a análise por meio de MEV. Os traços foram escolhidos levando em consideração os melhores resultados apresentados nos ensaios de tração na flexão e na avaliação da fissuração (maior número de fissuras dentro do terço médio). De cada traço foram realizadas análises em duas idades de cura, aos 56 e aos 91 dias, totalizando dozes análises de MEV, conforme apresentado na sequência:

- PPECC1 (CPV ARIRS+CCA+#200+PP) 56 dias
- PPECC1 (CPV ARIRS+CCA+#200+PP) 91 dias
- PPECC2 (CPV ARIRS+CCA+80/100+PP) 56 dias
- PPECC2 (CPV ARIRS+CCA+80/100+PP) 91 dias
- PPECC3 (CPV ARIRS+CV+#200+PP) 56 dias
- PPECC3 (CPV ARIRS+CV+#200+PP) 91 dias
- PPECC4 (CPV ARIRS+CV+80/100+PP) 56 dias
- PPECC4 (CPV ARIRS+CV+80/100+PP) 91 dias
- PPECC5 (CPV ARIRS+CCC+#200+PP) 56 dias
- PPECC5 (CPV ARIRS+CCC+#200+PP) 91 dias
- PPECC6 (CPV ARIRS+CCC+80/100+PP) 56 dias
- PPECC6 (CPV ARIRS+CCC+80/100+PP) 91 dias

No próximo capítulo será apresentada a análise dos resultados dos ensaios realizados e a análise do desempenho de cada traço desenvolvido na pesquisa.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será apresentada a análise dos dados obtidos com o desenvolvimento do programa experimental proposto no capítulo 3 desta dissertação. Serão apresentadas as análises quanto aos ensaios de compressão axial e tração na flexão, onde se determinou a resistência à compressão, o módulo de ruptura, o comportamento carga x deslocamento e o comportamento quanto à fissuração dos compósitos estudados. Ao final deste capítulo, são apresentadas as análises realizadas através das imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), que colaboram para a demonstração e o entendimento dos fenômenos ocorridos durante os ensaios mecânicos.

4.1.1 Compressão axial

A tabela 22 apresenta a média dos resultados obtidos no ensaio de compressão axial para os compósitos estudados, aos 56 e 91 dias. Os mesmos dados são apresentados graficamente, na figura 26.

Tabela 22 - Resistência à compressão axial aos 56 e 91 dias.

TRAÇÃO/MATERIAL USADO	56 DIAS	91 DIAS	Varição
	f_{cm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	%
PPECC1 ARI+CCA+200	38,0	39,1	2,9%
PPECC2 ARI+CCA+80/100	41,8	40,9	-2,2%
PPECC3 ARI+CV+200	45,9	61,7	34,4%
PPECC4 ARI+CV+80/100	26,9	40,2	49,4%
PPECC5 ARI+CCC+200	48,6	46,0	-5,3%
PPECC6 ARI+CCC+80/100	46,0	48,0	5,3%

Fonte: autora.

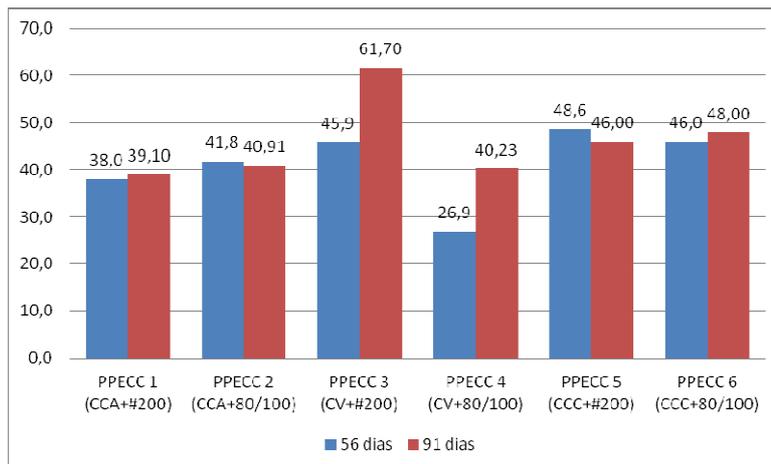


Figura 26 - Resistência à compressão axial.

Fonte: autora.

Os dados obtidos com a realização dos ensaios de compressão axial mostram que, com exceção do traço PPECC 3, a resistência à compressão dos compósitos fabricados com cinza de casca de arroz, com e sem controle de queima (CCA e CCC) praticamente não sofreram variação, dos 56 e 91 dias.

O provável motivo de não ocorrer um aumento na resistência à compressão dos 56 aos 91 dias, pode estar relacionado ao fato de que o cimento utilizado, de alta resistência inicial, possui alta reatividade a poucas idades, apresentando assim partículas mais finas com elevada superfície específica. A utilização deste cimento, garante ao compósito a resistência à compressão de dosagem a poucas idades (3 ou 7 dias). Após esta idade, em geral a resistência à compressão do compósito continua aumentando, de forma gradativa, até os 28 dias.

As duas cinzas de casca de arroz utilizadas, CCC e CCA, possuem índices de atividade pozolânica com cal e cimento compatíveis com as prescrições das normas brasileiras correspondentes: NBR 5751 (ABNT, 2012) e NBR 5752 (ABNT, 2012), conforme mostra a tabela 13 do Capítulo 3. Este fato se relaciona diretamente com o ganho de resistência ocorrido pelos compósitos estudados antes dos 56 dias, já que se referem a uma resistência à compressão axial mínima que deve ser alcançada até os 28 dias, com cimento (NBR 5752 (ABNT, 2012)), e até os 7 dias, com cal (NBR 5751 (ABNT, 2012)).

As médias dos valores de resistência à compressão axial para os compósitos fabricados com cinza de casca de arroz com queima controlada (CCC) foram levemente superiores, 18,54% aos 56 dias e 17,5% aos 91 dias, aos dos fabricados com cinza de casca de arroz sem controle de queima (CCA), moída por 120 minutos. Isso pode ocorrer devido à perda ao fogo da CCA (21,99%) ser superior ao da CCC (3,41%), conforme mostram os dados da tabela 12, do Capítulo 3.

No caso da resistência à compressão axial dos compósitos fabricados com cinza volante (CV) ocorre um fenômeno diferente: a resistência à compressão axial aos 91 dias foi superior à dos ensaios aos 56 dias (25,69% superior no PPECC3 e 33,13% superior no PPECC4), provavelmente devido às próprias características físicas e químicas da cinza volante, explicadas a seguir.

O diâmetro médio da cinza volante utilizada nos compósitos (48,23 μ m) é superior aos diâmetros médios das CCA (27,07 μ m) e da CCC (11,06 μ m). Provavelmente por que as reações de hidratação deste material podem ocorrer mais tardiamente, ocasionando o aumento na resistência à compressão verificado nos compósitos PPECC3 e PPECC4, após os 56 dias.

Os ensaios para determinação do índice de atividade pozolânica da CV, realizados conforme as recomendações da NBR 5751 (ABNT, 2012) e NBR 5752 (ABNT, 2012), indicaram que o material não atinge as resistências à compressão axial mínimas exigidas aos 28 dias, com cimento (39% da resistência da argamassa sem material pozolânico, enquanto o mínimo seria 75%) e aos 7 dias com cal (1,79MPa, enquanto o mínimo seria 6MPa). Entretanto, os compósitos fabricados com CV apresentaram resultados de resistência à compressão axial equivalentes (PPECC4) ou superiores (PPECC3) aos dos compósitos fabricados com cinza de casca de arroz, aos 91 dias, confirmando a hidratação tardia do material pozolânico.

A baixa perda ao fogo da CV (3,31%) também pode ter contribuído nos valores da resistência à compressão axial dos compósitos PPECC3 e PPECC4 aos 91 dias.

4.1.2 Tração na flexão

4.1.2.1 Comportamento carga x deslocamento

Os resultados dos ensaios de flexão à quatro pontos dos diferentes compósitos são apresentados nas figuras 27. Das três amostras realizadas para cada compósito desenvolvido, os resultados apresentados nas figuras, mostram a carga aplicada e o deslocamento obtido na prensa, para a curva que melhor representou o comportamento carga x deslocamento, considerando as idades de 56 e 91 dias.

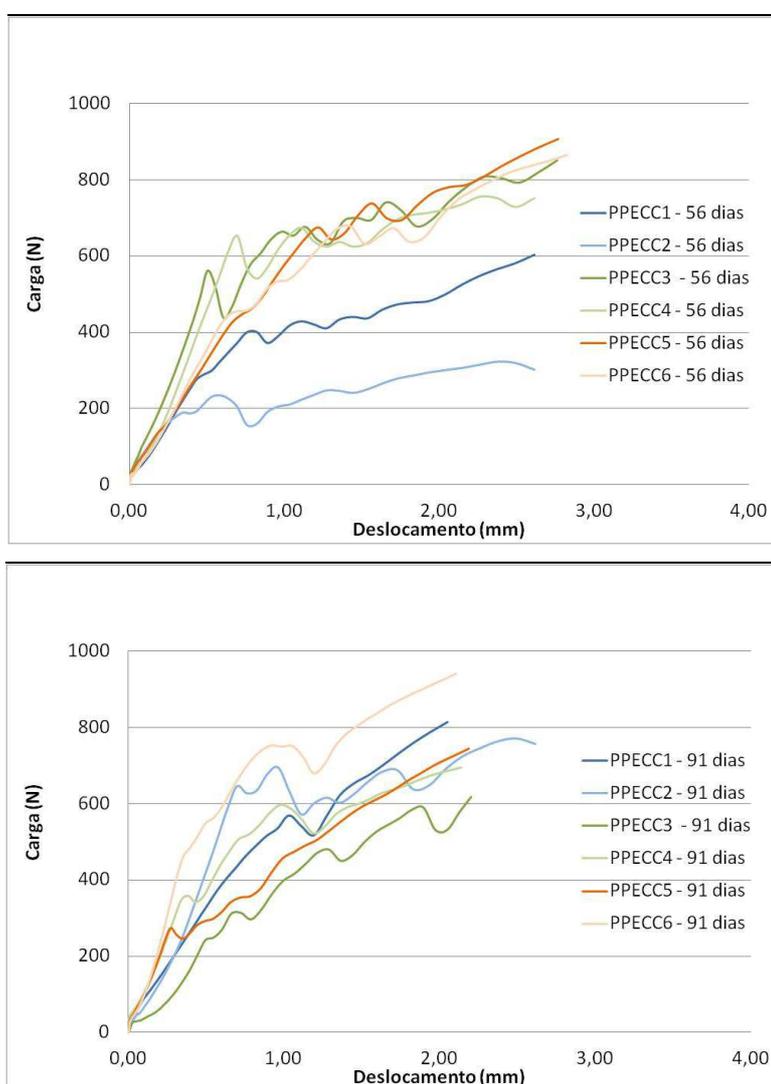


Figura 27 - Comportamento carga x deslocamento aos 56 e 91 dias.
Fonte: autora.

Em geral, pode-se observar que as curvas apresentadas são características de materiais que não rompem de forma frágil. Os PPECC

produzidos, embora sejam compostos com fibras de PP dispersas em uma matriz cimentícia, que é frágil, tem comportamento dúctil.

Para exemplificar a diferença de um compósito cimentício com comportamento frágil (concreto) e compósitos cimentícios com fibras de aço (PRC) ou PVA (PVAECC) dispersas na matriz, que apresentam comportamento mais dúctil, pode ser utilizada a figura 28, apresentada por Garcez (2009, p. 118), adaptada de Qian (2007). A figura 28 mostra que a capacidade de deformação de um ECC é consideravelmente maior que a de um concreto convencional, que apresenta comportamento frágil.

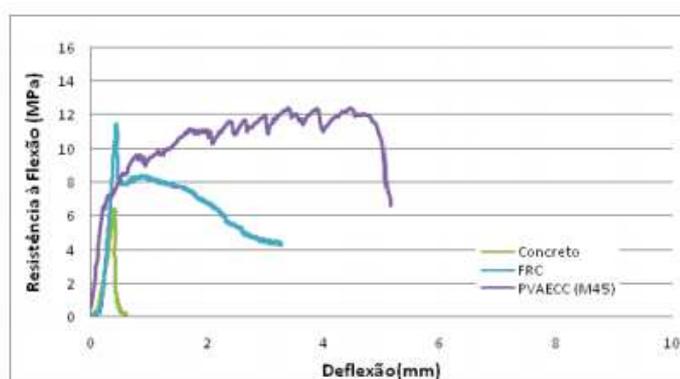


Figura 28 - Exemplo de comportamento à flexão de concreto, PRC e PVAECC.

Fonte: Garcez (2009, p. 118), adaptada de Qian (2007).

A figura 29, dos PPECC produzidos neste trabalho, mostra ainda que ocorreu um leve aumento no carregamento aplicado nas placas quando comparados os ensaios aos 56 dias (entre 300N e 900N) e aos 91 dias (entre 500N e 1000N).

Entretanto, na figura 29, ao analisar cada compósito individualmente, observa-se que ocorreu uma variabilidade nos dados obtidos nos ensaios de flexão, onde nem sempre ocorreu um melhor comportamento dos compósitos aos 91 dias, quando comparados aos 56 dias.

A variação apresentada no desempenho à flexão é comum dos compósitos que utilizam fibras em sua composição. Entretanto o que pode ter contribuído ainda mais para esta variação pode estar relacionado às diferentes argamassadas que foram necessárias para moldar o número de corpos de provas determinados no programa experimental. Ou seja, as fibras podem não ter sido dispersas de forma eficiente nas diferentes argamassadas necessárias ao mesmo

traço, prejudicando a homogeneidade do compósito. Ocasionalmente assim, defeitos na matriz que impedem a microfissuração e, conseqüentemente, diminuem o desempenho a flexão dos PPECC, ou seja, sua capacidade de deflexão. Outro fator a ser levado em consideração é o volume de fibra utilizado, de 2% do volume do compósito, significando uma grande quantidade de fibra a ser dispersa na matriz.

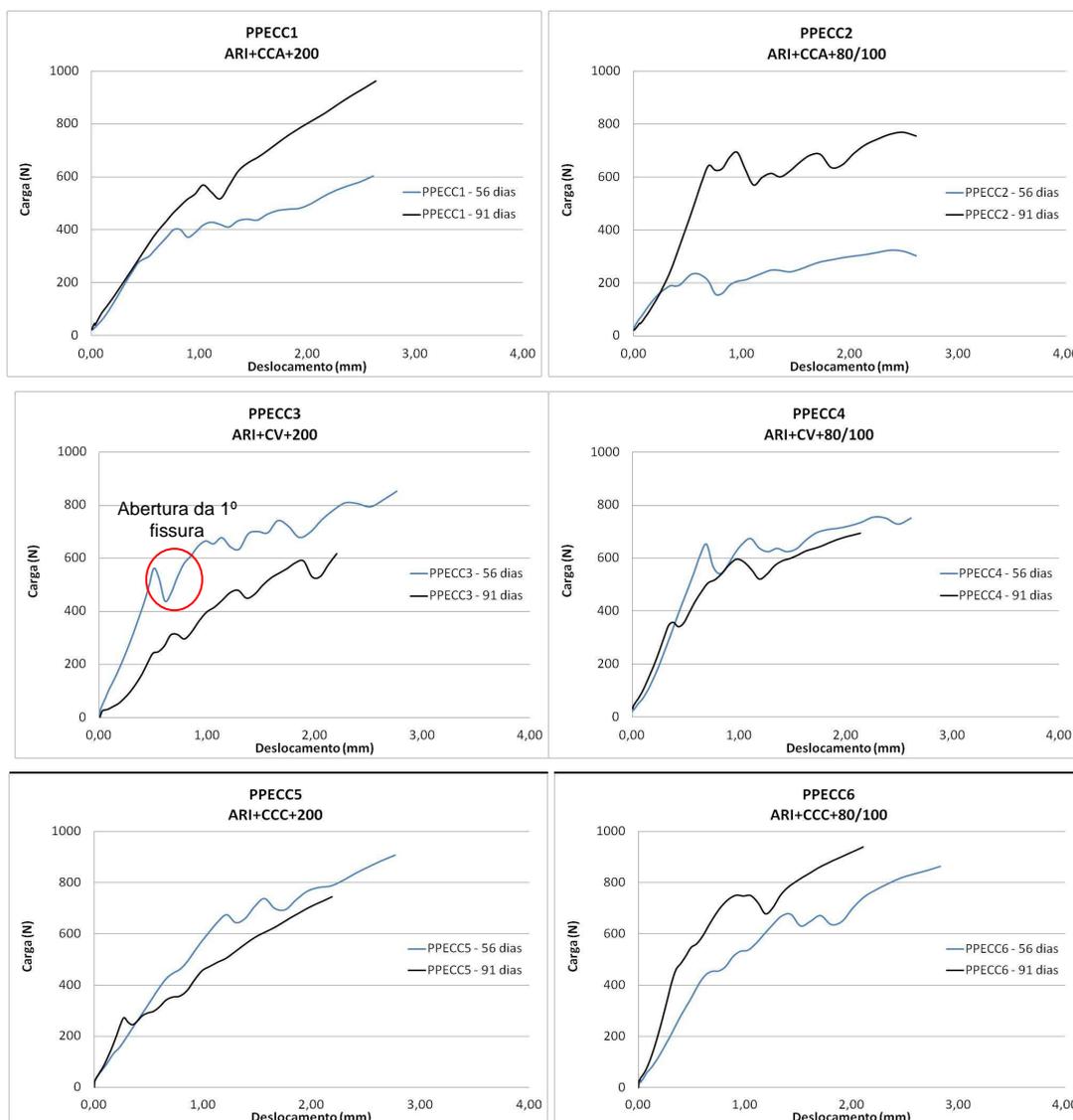


Figura 29 - Comportamento carga x deslocamento para cada compósito.

Fonte: autora.

De maneira geral, os compósitos sofrem incremento no nível de carregamento à flexão, ou mantém o mesmo nível de carregamento, com exceção do compósito PPECC3, que apresentou um decréscimo com a idade. A má distribuição das fibras na parte central de alguns corpos de prova pode ter ocasionado o baixo desempenho do comportamento dos compósitos aos 91 dias

em relação ao seu comportamento aos 56 dias. No entanto, todos os compósitos mantiveram o comportamento dúctil, conforme esperado nos compósitos do tipo *ECC*.

Os gráficos da figura 29 mostram o comportamento denominado de endurecimento por deformação, também chamado de *strain-hardening*, que garante a obtenção de uma resposta dúctil para o compósito. Este comportamento é caracterizado pelas sucessivas recuperações de carga pelo compósito após a ocorrência da primeira fissura, ou o final da fase elástica. Nas curvas que representam o comportamento carga x deslocamento dos compósitos cada queda representa uma abertura de fissura. A posterior continuação do ensaio, após cada queda (abertura de uma fissura) com aumento do carregamento, representa o *strain-hardening* e conseqüentemente a capacidade do multifissuração do compósito.

4.1.2.2 Módulo de ruptura

Os valores dos módulos de ruptura (MOR), que representam a resisitência à flexão dos compósitos cujos comportamentos carga x deslocamento estão mostrados na figura 21, podem ser observados na tabela 23 e na figura 30.

Os resultados do incremento no MOR estão de acordo com a resposta carga x deslocamento obtida nos ensaios à flexão, apresentados nos gráficos da figura 30.

Com excessão do traço PPECC2, todos os valores de MOR obtidos para os PPECC, fabricados com fibra de polipropileno, superam o valor 9MPa já aos 56 dias. Concretos tradicionais, por exemplo, apresentam valores de MOR entre 4MPa e 6MPa, segundo Qian (2007). Alguns autores, como por exemplo Garcez (2009), estimam que o MOR de compósitos do tipo PPECC seja equivalente a 2 ou 3 vezes a resistência à tração do compósito. Embora o MOR destes compósitos não seja muito superior ao de concretos convencionais, sua capacidade de deflexão (deslocamento vertical no ensaio de flexão) o é, sendo esta a principal característica desejada no comportamento à flexão de um *ECC*. A capacidade de deflexão destes compósitos segue, em geral, a mesma tendência de sua deformação quando ensaiados à tração.

Tabela 23 - Resultados do módulo de ruptura.

COMPÓSITO	MOR (MPa)	
	56 DIAS	91 DIAS
PPECC1 ARI+CCA+200	9,20	14,67
PPECC2 ARI+CCA+80/100	4,92	11,74
PPECC3 ARI+CV+200	12,98	9,41
PPECC4 ARI+CV+80/100	11,52	10,58
PPECC5 ARI+CCC+200	13,82	11,34
PPECC6 ARI+CCC+80/100	13,17	14,32

Fonte: a autora.

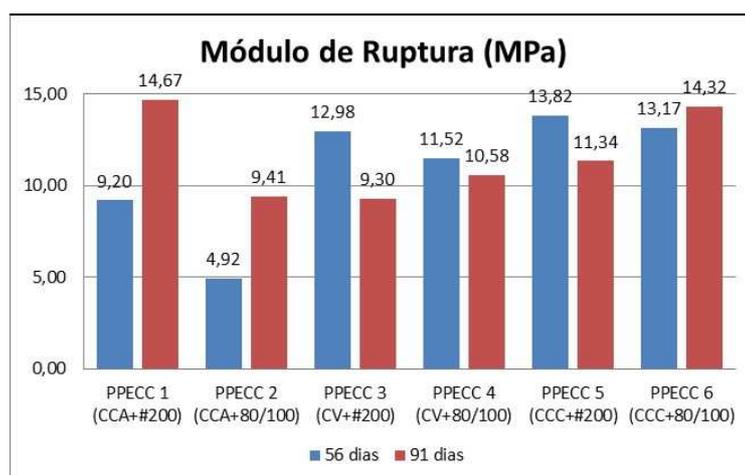


Figura 30 - Módulo de ruptura (MOR).

Fonte: autora.

4.1.3 Fissuração

As figuras 31 e 32 mostram as configurações das fissuras aos 56 e 91 dias para as placas ensaiadas à flexão para cada compósito.

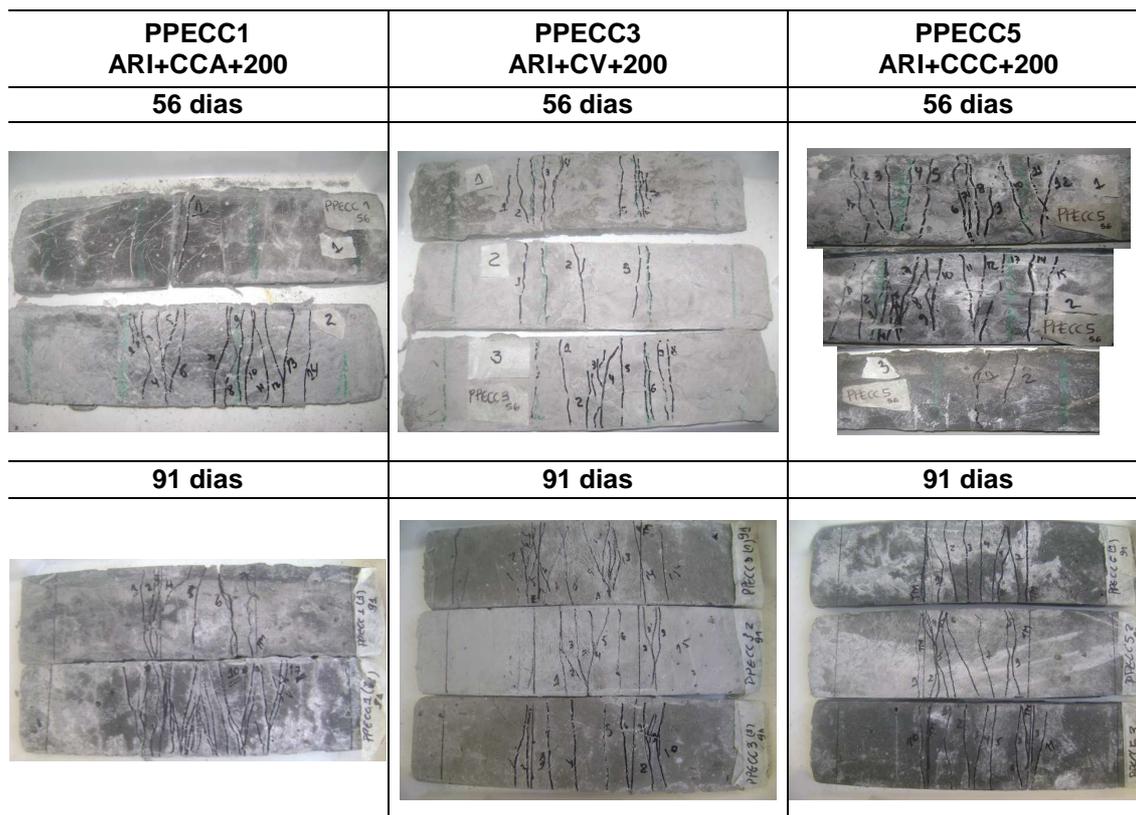


Figura 31 - Configuração de fissuras aos 56 e 91 dias do PPECC1 PPECC3 e PPECC5.

Fonte: autora.

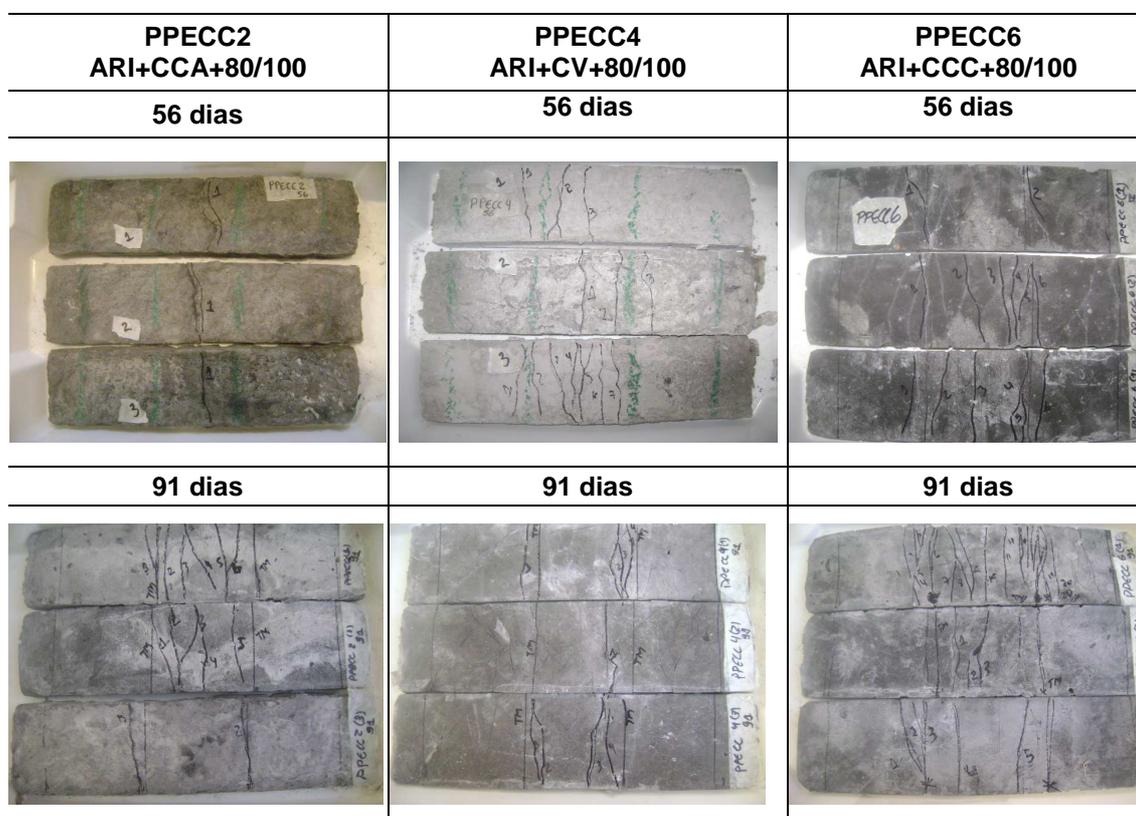


Figura 32 - Configuração de fissuras aos 56 e 91 dias do PPECC2 PPECC4 e PPECC6.

Fonte: autora.

De forma geral, as figuras 31 e 32 mostram o desenvolvimento do processo de microfissuração dos PPECC. A diferença no comportamento de um concreto convencional e de um PPECC é que o concreto convencional, após fissurar, perde toda a sua capacidade de carga de forma súbita, no fim da fase elástica. O processo de microfissuração múltipla dos PPECC ocorre após a fase elástica de deformação e é ocorre pela elevada capacidade de deformação do compósito, em conjunto com o *strain-hardening*.

Em um compósito do tipo PPECC, cuja matriz é frágil, como explica Garcez (2009, p.62), a resistência à primeira fissura é determinada pelo maior defeito na seção normal à máxima tensão principal, pois este ponto requer uma menor energia para que o prolongamento da falha original ocorra. No momento do início da extensão da primeira fissura, termina a zona elástica do material e começa a fase plástica (inelástica) do compósito, na qual múltiplas fissuras se formarão, dependendo a configuração e do tamanho dos defeitos pré-existentes na matriz. A primeira fissura deriva do maior defeito presente na matriz. A segunda fissura ocorrerá no seguinte defeito de maior grandeza disponível, e assim sucessivamente, até que a energia disponível não seja capaz de provocar o prolongamento das falhas existentes, resultando no dano localizado na fissura com menor capacidade de ponteamto das fibras, sendo esta a fissura última. Esta fissura determinará a resistência última à tração do compósito.

A tabela 24 apresenta uma contagem do número de fissuras nas placas de cada compósito que apresentaram o maior número de fissuras dentre as três da mesma série, submetidas ao ensaio de flexão. Foram contabilizadas as fissuras dentro do terço médio das placas e o número total de fissuras.

O número de fissuras que se desenvolvem no PPECC é governado pelo tamanho dos defeitos presentes na matriz e à sua distribuição espacial. Com excessão do PPECC6, os PPECC fabricados com areia silicosa 200¹ (mais fina) apresentaram um número de fissuras superiores aos fabricados com areia quartzosa 80/100². Cabe ressaltar que nos processos de produção de PPECC as falhas em escalas macroscópicas são praticamente inevitáveis, principalmente as

¹ Areia silicosa 200: Areia produzida pela empresa Mineradora Jundu LTDA, a granulometria média apresentada fica na ordem de 75µm.

² Areia quartzosa 80/100: Areia produzida pela empresa Mineradora Jundu LTDA, a granulometria média apresentada fica na ordem de 150µm.

que estão relacionadas à incorporação de ar e também por entrelaçamento das fibras. Mesmo que estes defeitos sejam isolados e em número limitado, são os pontos intensificadores de tensão e iniciadores das fissuras.

Tabela 24 - Contagem do número de fissuras dentro do terço e total, aos 56 e 91 dias.

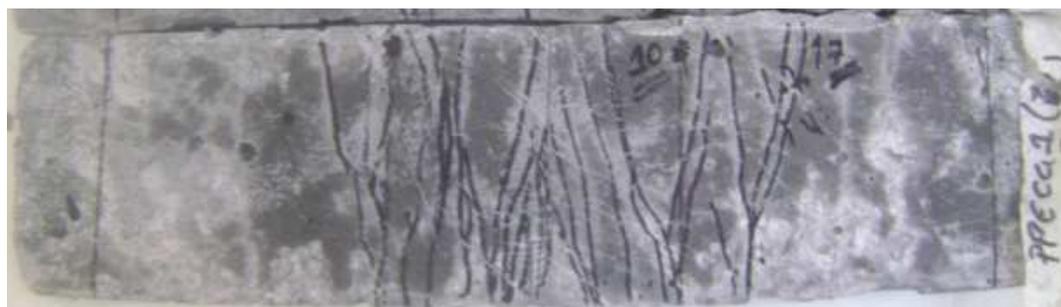
CONTAGEM DE FISSURAS				
TRAÇO	56 DIAS		91 DIAS	
	TERÇO MÉDIO	TOTAL DE FISSURAS	TERÇO MÉDIO	TOTAL DE FISSURAS
PPECC1 ARI+CCA+200	8	14	10	17
PPECC2 ARI+CCA+80/100	1	1	5	6
PPECC3 ARI+CV+200	5	8	8	15
PPECC4 ARI+CV+80/100	6	7	4	4
PPECC5 ARI+CCC+200	9	15	8	11
PPECC6 ARI+CCC+80/100	4	6	14	20

Fonte: autora

As figuras 33 a 38 mostram as placas de PPECC que obtiveram o maior número de fissuras no terço médio do vão, em cada compósito produzido. Este critério foi utilizado porque a própria ASTM 78 – 02 (2002) indica desconsiderar as placas em que a fissura principal, que ocasionou a ruptura da placa, ultrapassar os terços médios em 5%.



(a)



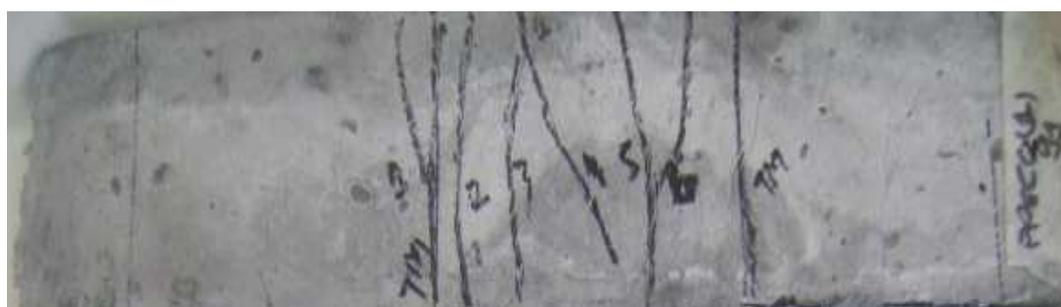
(b)

Figura 33 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC1 - ARI+CCA+200: (a) 56 dias; (b) 91 dias.

Fonte: autora.



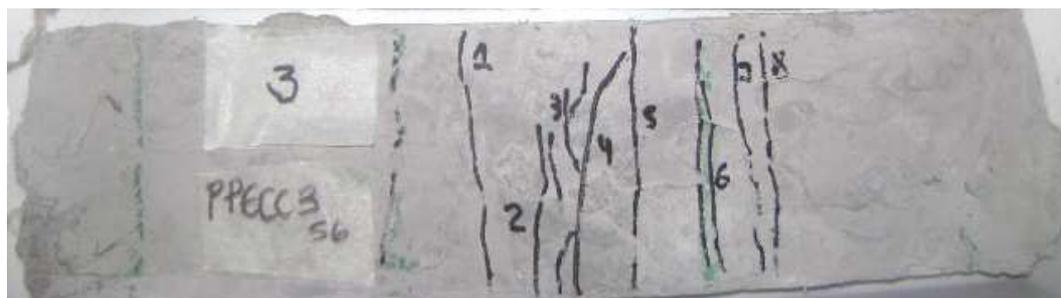
(a)



(b)

Figura 34 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC2 - ARI+CCA+80/100: (a) 56 dias; (b) 91 dias.

Fonte: autora.



(a)



(b)

Figura 35 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC3 - ARI+CV+200: (a) 56 dias; (b) 91 dias.
Fonte: autora.



(a)



(b)

Figura 36 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC4 - ARI+CV+80/100: (a) 56 dias; (b) 91 dias.
Fonte: autora.



(b)

Figura 37 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC5 - ARI+CC+200: (a) 56 dias; (b) 91 dias.

Fonte: autora.



(a)



(b)

Figura 38 - Configuração de fissuras para as placas do traço PPECC6 - ARI+CCC+80/100: (a) 56 dias; (b) 91 dias.

Fonte: autora.

O efeito *strain-hardening* é responsável pela ductibilidade característica dos ECC. Este efeito permite que o compósito sofra elevadas deformações sem romper. Pode-se observar o efeito *strain-hardening* na figura 39, apresentada por

Garcez (2009, p.34), adaptada de Qian (2007), que mostra o padrão de fissuração de um compósito de ECC.



Figura 39 - Aspecto de um padrão de fissuração de um compósito de ECC
Fonte: Garcez (2009, p.34), adaptada de Qian (2007).

Ao comparar as figuras 33 a 38, com a figura 39, podemos observar quais traços apresentaram melhor comportamento frente ao aspecto de fissuração. Em geral todas as placas apresentaram o aspecto de multifissuração, sendo que o PPECC1 e o PPECC5 foram os que apresentaram a maior quantidade de fissuras, considerando as duas idades ensaiadas. O traço que apresentou o pior desempenho foi o PPECC2 aos 56 dias, que apresentou somente uma fissura, o que não é desejado em um ECC.

Com relação aos gráficos carga x deslocamento (Figura 29) pode-se analisar a combinação de um comportamento de endurecimento por deformação e o desenvolvimento de um padrão de multifissuração. Essa combinação pode ser observada em cada queda seguida de uma elevação, podendo ser visualizada pelas oscilações apresentadas na curva da carga x deslocamento. Cada oscilação refere-se a uma fissuração, sendo a queda na curva a falha encontrada na matriz e a elevação na curva à atuação da fibra na distribuição da carga. Sendo assim na figura 20 os gráficos referentes aos traços PPECC3 e PPECC4 apresentam o melhor comportamento quanto à microfissuração.

4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As figuras 32 e 35 apresentam imagens de secções de ruptura dos compósitos obtidos aos 56 e 91 dias, respectivamente, em microscópio eletrônico de varredura (MEV) sob magnificações de 40 e 1.000 vezes. As imagens obtidas

a partir do MEV permitiram uma análise morfológica tanto da matriz quanto das fibras do compósito. O MEV utilizado foi de bancada, modelo HITACHI TM 3000, pertencente ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS.

As deformações observadas na superfície de ruptura das fibras podem ser associadas à otimização de desempenho durante os ensaios mecânicos, conforme se pode observar nas figuras 40(e), 41(i) e 41(k), referentes às amostras obtidas aos 56 dias para PPECC3, PPECC5, PPECC6, respectivamente. As amostras mencionadas acima obtiveram desempenho satisfatório tanto nas análises de resistência à compressão axial quanto à tração na flexão. Nestes casos, possivelmente a carga submetida à matriz pôde ser facilmente transmitida às fibras, que por esse motivo, apresentam tal deformação física após a ruptura do compósito.

As amostras das figuras 40(a), 40(c), 42(a) e 42(c), apresentam morfologias semelhantes, com fibras deformadas, porém, rompidas junto à superfície de ruptura, sugerindo que carga submetida à matriz não pôde ser facilmente transmitida às fibras, que por esse motivo, romperam precocemente, isto explicaria os desempenhos inferiores nas análises de tração na flexão, quando comparados aos demais compósitos.

Nas amostras das figuras 42(e), 43(i) e 43(k), referentes às amostras obtidas aos 91 dias, PPECC3, PPECC5 e PPECC6, respectivamente, não se observa nitidamente a deformação. Nestes casos, as fibras arrancadas sofreram processo de escorregamento, o que pode ocasionar o rompimento precoce do compósito ao ensaio de flexão.

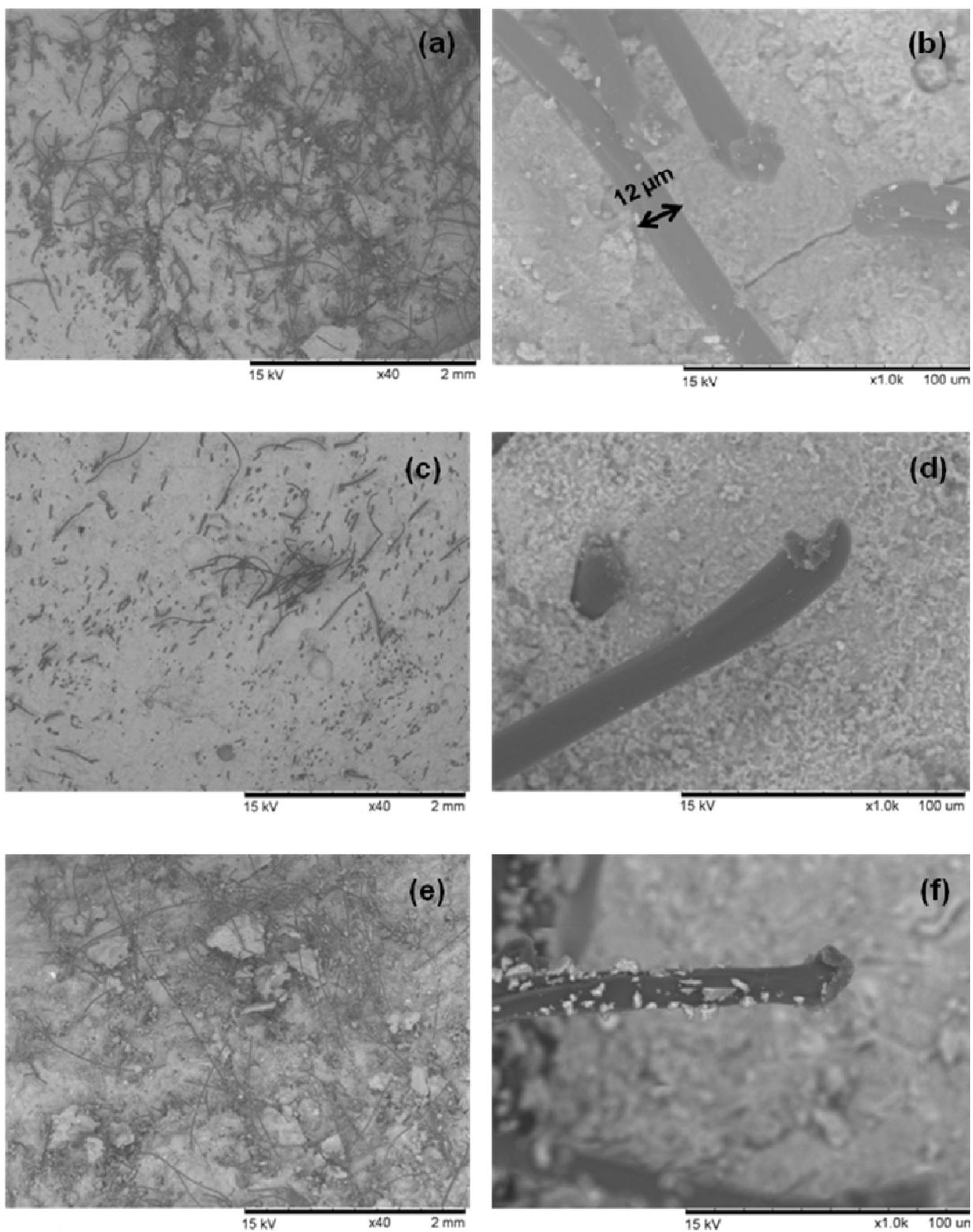


Figura 40 - Imagens por MEV dos compósitos aos 56 dias: (a) PPECC1; (c) PPECC2; (e) PPECC3. Magnificação: 40X. e (b) PPECC1; (d) PPECC2; (f) PPECC3 Magnificação: 1000x.

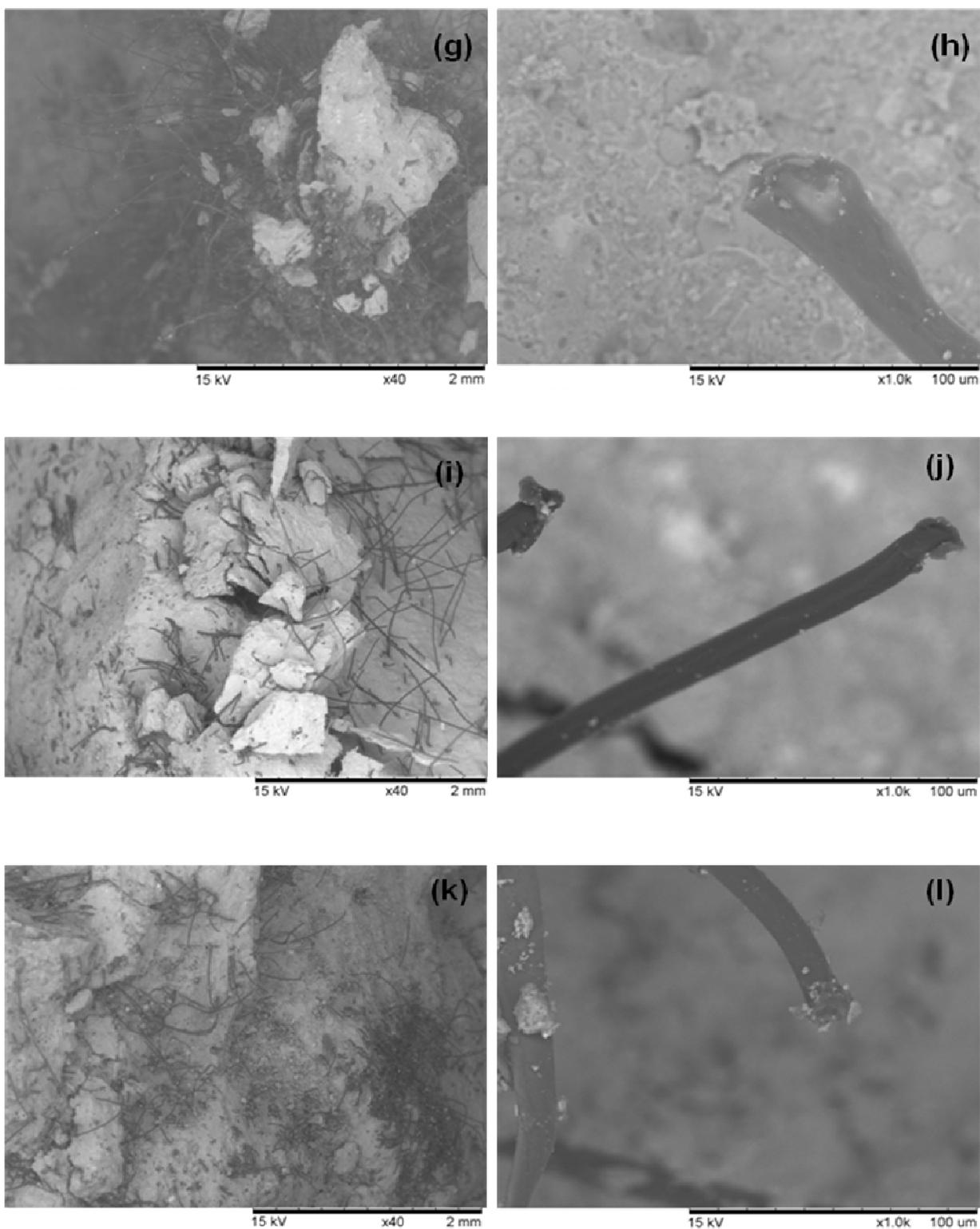


Figura 41 - Imagens por MEV dos compósitos aos 56 dias: (g) PPECC4; (i) PPECC5; (k) PPECC6. Magnificação: 40x; (h) PPECC4; (j) PPECC5; (l) PPECC6. Magnificação: 1.000x.

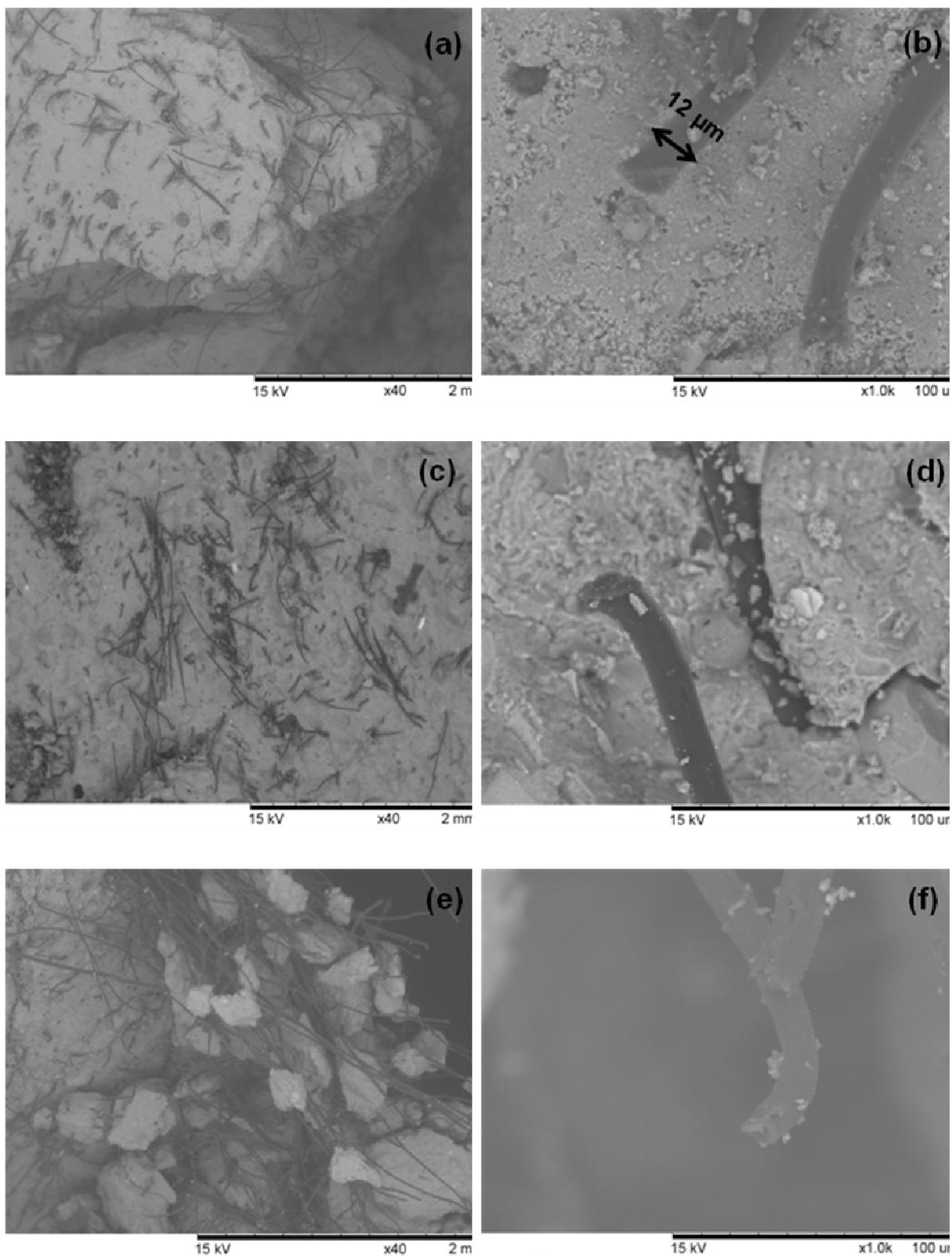


Figura 42 - Imagens por MEV dos compósitos aos 91 dias: (a) PPECC1; (c) PPECC2; (e) PPECC3 (Magnificação 40x) e (b) PPECC1; (d) PPECC2; (f) PPECC3 (Magnificação 1.000x).

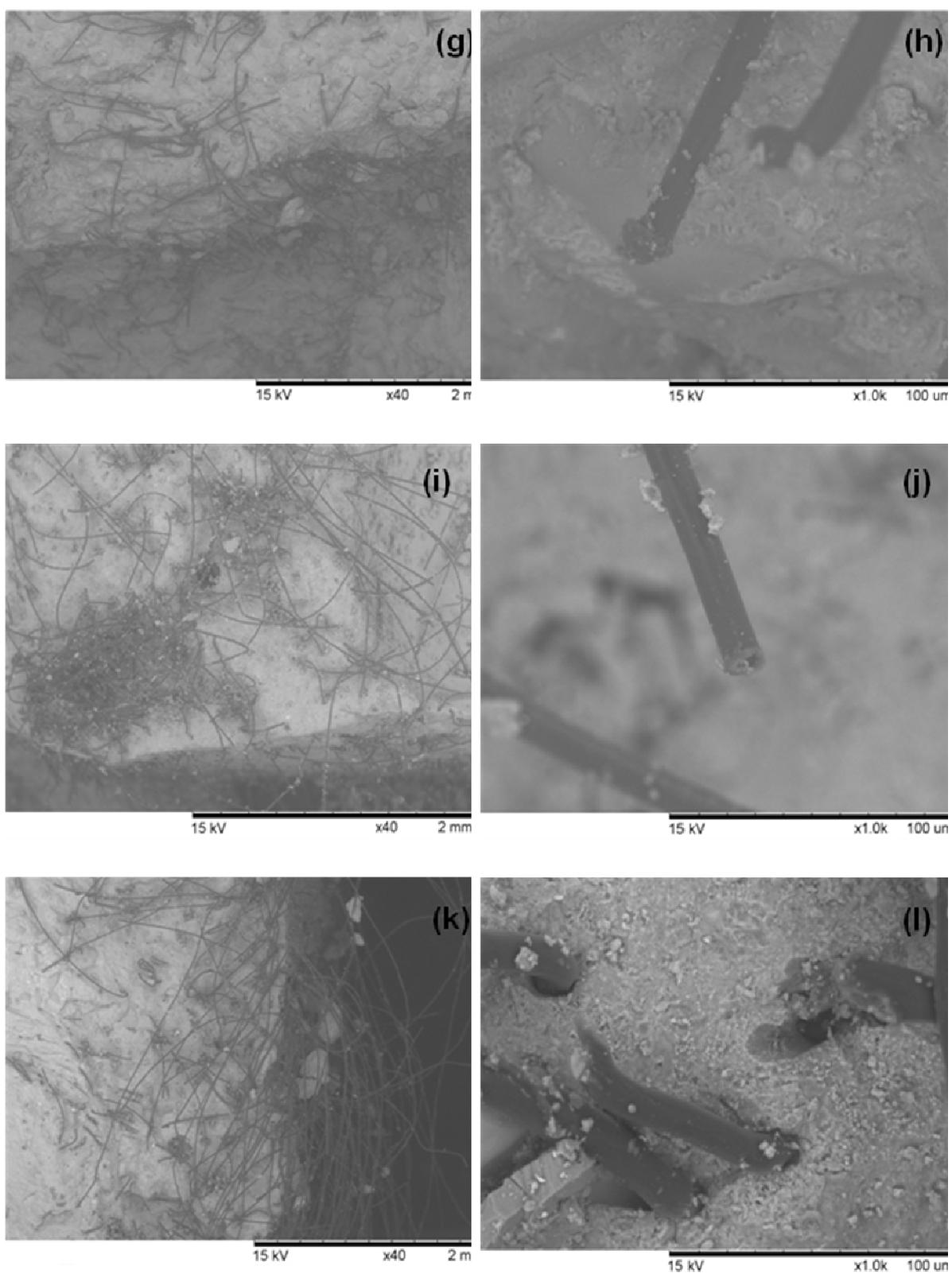


Figura 43 - Imagens por MEV dos compósitos aos 91 dias: (g) PPECC4; (i) PPECC5; (k) PPECC6 (Magnificação 40x) e (h) PPECC4; (j) PPECC5; (l) PPECC6 (Magnificação 1.000x).

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre a investigação experimental realizada para avaliar a possibilidade de utilizar materiais pozolânicos disponíveis na região sul do Brasil para desenvolver um ECC com fibras de polipropileno.

Algumas considerações podem ser elencadas, após o desenvolvimento deste trabalho:

- Como o bom desempenho de um ECC está diretamente ligado à interação entre a fibra e a matriz, cada material a ser utilizado deve passar por um processo de caracterização minucioso. A escolha do material implicará na resposta mecânica que é necessária e característica de um ECC;
- Além da escolha dos materiais adequados, outro fator crucial é a fase de confecção dos compósitos, a homogeneidade da pasta e as condições adequadas de cura fazem toda a diferença nos resultados obtidos. Isso porque, como o que se analisa é a transferência de carga pela fibra e pela matriz, se a distribuição da fibra não se apresentar homogênea, a matriz apresentará falhas que comprometerão a ductilidade característica dos ECCs.
- Na fase de ensaios mecânicos observou-se, no ensaio a compressão, que as matrizes desenvolvidas com cinza de casca de arroz (tanto as com controle de queima – CCC, quanto às sem controle de queima – CCA), apresentaram valores de compressão superiores a 35MPa, somente o PPECC4, apresentou valor inferior. Observou-se que em alguns traços a resistência não se elevou a medida que a idade avançou (PPECC2 e PPECC5). Já o PPECC1 e o PPECC6 apresentaram aumento da resistência à medida que a idade avançou, como o esperado. O PPECC4 foi o traço que apresentou o pior desempenho no que se refere à resistência. Já o PPECC3 foi o que apresentou o maior valor de resistência à compressão e o comportamento característico de matrizes que utilizam material pozolânico, que é o aumento gradual da resistência à medida que a idade avança.
- No ensaio de tração na flexão, a busca foi identificar o efeito *strain-hardening*. Levando em consideração este efeito, o PPECC2 (91 dias),

PPECC3 (56 dias), PPECC4 (56 dias) foram os que apresentaram as melhores curvas. O PPECC3 (56 dias) entre todos foi o que apresentou o maior número de quedas de carga ao longo da curva.

- A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou o traço que apresentou a melhor interação entre fibra e matriz, permitiu identificar que em alguns traços a fibra rompeu junto à superfície, e, em outros, ela não aderiu a matriz, ocorrendo assim o seu escoamento dentro da matriz. O PPECC3 aos 56 dias foi o que apresentou a distribuição das fibras na matriz de forma mais homogênea, além de apresentar pasta aderida em seu entorno.

Considerando os dados experimentais e as considerações acima descritas, podem ser elencadas as seguintes conclusões:

- É viável a produção de um ECC com materiais pozolânicos fabricados e disponíveis na região sul do Brasil;
- Os traços que apresentaram os melhores resultados no ensaio de tração à flexão foram os compostos pela cinza volante.

Cabe salientar que devem ser realizadas pesquisas mais aprofundadas, a fim de verificar: a utilização de outros tipos de cimentos, o comportamento à fadiga e a durabilidade. Além disso, se faz necessário à realização de outros ensaios mecânicos, como ensaio de tração direta e o de desgaste por abrasão, para verificar se o desempenho destes compósitos será satisfatório também nessas esferas.

Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 116R-90: Cement and concrete terminology. In: **ACI Manual of Concrete Practice – Part 1**. Detroit, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C78 – 02: standard test method for flexural strength of concrete. West Conshohocken, Pennsylvania, 2002a.

_____. ASTM C1399: standard test method for obtaining average residual-strength of fiber reinforced. West Conshohocken, Pennsylvania, 2002b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 125-93: Definitions of terms relating to concrete and concrete aggregates. In: **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos-de-prova. Rio de Janeiro. Dez.2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. Jul.1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação. Abr.2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. Ago.1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7222 - Argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. Mar.1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 7251 – Agregado em estado solto – Determinação da massa unitária. Abr.1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 8522 – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Dez. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 9479 - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto. Rio de Janeiro. Jun.1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 9776 - Agregados - determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro. Mar.1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. Ago. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 18 – Cimento Portland – Determinação de Perda ao fogo. Rio de Janeiro. Jul.2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 45 – Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. Abr.2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 52 – Agregado miúdo – Determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro. Jan.2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. Fev.1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT - NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. Nov.2003.

BEZERRA, Izabelle M. T.; SOUZA, Jozilene; CARVALHO, João B. Q.; NEVES, Gelmires A. **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. Competência:** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, São Paulo. V. 15, nº6.p .1807-1929. 2011.

BUENO, C.F.H. **Tecnologia dos Materiais de Construção.** Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Construções Rurais e Ambiente. Viçosa, MG, Brasil, 2000.

BUI, V.K.; MONTGOMERY, D.; HINCZAK, I.; TURNER, K. *Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete.* **In: Cement and Concrete Research**, n.32, p.1489-1496, 2002.

CASAGRANDE, E. Q. **Compósito reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante: estudo do desempenho em pavimento de concreto.** 2012. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação e Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CHIARELLI, Marco Antônio. **Concreto de alto desempenho com sílica de casca de arroz.** 2012. 42f. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de ciências tecnológicas, Universidade de Blumenau, Santa Catarina, 2012.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1195-1225. v. 2.

FERREIRA, Ângela. Azevedo. **Concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz: Avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. 1999. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação e Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

GARCEZ, E. O. **Investigação do Comportamento de Engineered Cementitious Composites Reforçados com Fibras de Polipropileno como Material para Recapeamento de Pavimentos**. 2009. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GEYER. A.L.B.; SÁ. R.R. Importância do Controle de Qualidade do Concreto no estado Fresco. **Realmix**, n.2, jul.2006.

Guia de Sustentabilidade na Construção. CÂMARA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. Belo Horizonte: FIEMG, 2008. 60p.

GUIMARÃES, A. T. C. **CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações**. v.2. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 792p.

HELENE, P. **CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações**. v.2. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 792p.

GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto fluido**. Pini, Ibracon, São Paulo, 1999.

ISAIA, G. C. **CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações**. v.2. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 792p.

LEE, A. W. C. Bending and thermal insulation properties of cement-bonded cypress excelsior board. 1985. *Forest Prod J*25(11/12):57–58

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, Nov. 2003.

LI, V. C.; YANG, E. H. **Self Healing in Concrete Materials**. Springer: Sybrand van der Zwaag, 2007.

LUCCA, C. K. ANA, . **Reação Álcali Agregado: Efeito do uso de cinza volante**. 2010, 95f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

METHA. P.K.; MONTEIRO. P. J. M. **Concreto – Estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. PINI. 1994.

NETO, C. S. **CONCRETO: Ensino, pesquisa e realizações**. v.2. Ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. 792p.

NETTO, M. Rafael. **Materiais Pozolânicos**. 2006, 150f. Monografia (especialização em construção civil) UFMG – Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 2.ed. Tradução por Salvador E. Giammuso, São Paulo, SP. Pinni, 1997, 749p.

NEVILLE, A. M. **Neville on Concrete – An examination of issues in concrete practice**. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2003.

NOGUEIRA, Josiane Ramos; **Reciclando cinzas: Estudo de viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado**. 2011. p.133. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

PEREIRA, Tobias Azevedo da Costa. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adição de fibras de lã de rocha ou poliamida**. 2010. 281f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PERRONE, V. C.; BARCELOS, M.; STEIN, K.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação da influência do teor de agregados no comportamento em compressão de compósitos tipo SHCC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Maceió. **Anais...**

PINHEIRO. L.M.; MUZARDO. C.D.; SANTOS. S.P.; CATOIA. T.; CATOIA. B. **Estruturas de concreto**. Departamento de Engenharia de Estruturas. USP, mar.2010.

POUEY, M.T.; DAL MOLIN, D.C.C.; BERGMANN, C.P. **Avaliação de diferentes processos de moagem de cinzas de casca de arroz residuais com diferentes características mineralógicas através do Índice de Atividade Pozolânica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 49., 2007. Bento Gonçalves. **Anais...** 1 CD-ROM.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. EDIPUCRS, 2011.

RODRIGUES, Michelli S.; BERALDO, Antônio L. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual**. **Competência**: Portal de periódicos CAPES/MEC – Revista Brasileira de engenharia Agrícola e Ambiental, June 2011. Vol. 15. p.639.

ZHU, Yu; YANG, Yingzi; YAO, Yan. **Use of slag to improve mechanical properties of engineered cementitious composites (ECCs) with high volumes**

of fly ash. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China – *Jorna: Construction and Building Materials* 36. 2012. p.1076–1081.

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