

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Caracterização do Comportamento de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação com a Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz**

**Débora Pedroso Righi**

Porto Alegre  
2015

DÉBORA PEDROSO RIGHI

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE  
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE  
DE DEFORMAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE  
POLIPROPILENO E CINZA DE CASCA DE ARROZ**

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

Porto Alegre  
2015

**DÉBORA PEDROSO RIGHI**

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE  
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE  
DE DEFORMAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE  
POLIPROPILENO E CINZA DE CASCA DE ARROZ**

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

Porto Alegre, 17 de junho de 2015.

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

Prof. Armando Miguel Awruch  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof. José Ivo Padaratz (UFSC)**  
Dr, University of Edinburgh

**Profa. Angela Gaio Graeff (UFRGS)**  
PhD, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Profa. Estela Oliari Garcez (UFPel)**  
Dra, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho ao amor da minha vida (Lucas Köhler) por todo o apoio e cumplicidade, com você me sinto viva! E a você meu anjinho de luz (Clara *in memoriam*) que me iluminou para seguir trilhando esse caminho quando tudo parecia escuridão.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por nascer em uma boa família, acompanhada sempre de bons amigos e pelas ótimas oportunidades que Ele me proporcionou para um crescimento maior.

Agradeço aos meus pais, Zeneida Perroni Pedroso e João Antônio Righi, e ao meu segundo pai (meu pai de coração) Samuel Neves dos Santos por todos esses anos de dedicação, incentivo e apoio aos meus planos e sonhos.

Agradeço em especial ao meu namorado amado Lucas Köhler pela convivência, paciência e principalmente pelo incentivo durante toda essa jornada, que esta seja apenas uma de muitas vitórias que conquistaremos juntos.

Agradeço ao meu anjinho de luz Clara, que me deixaste tão cedo, mas tempo suficiente para marcar a minha vida para sempre, a dinda/tia vai ter amar eternamente.

Agradeço aos meus irmãos pelo amor incondicional, irmãos são almas que Deus coloca na nossa vida para nunca nos sentirmos sós (Andressa, Samoel, Rafael e Carlos Roberto).

Agradeço a minha tia Rosane por todo o amor e carinho que me proporcionou quando cheguei a Porto Alegre. És minha segunda mãe, amo você!

Agradeço ao meu Orientador Professor Luiz Carlos da Silva Pinto Filho por todo o apoio na realização deste trabalho e pela amizade que conquistamos durante esse período de aprendizado, obrigada pela compreensão, e carinho que sempre teve comigo e por acreditar sempre nos meus sonhos.

Agradeço a minha Orientadora de coração e amiga Professora Angela Gaió Graeff por todo o apoio no desenvolvimento deste trabalho, pelas horas e horas de orientações e também pelas horas e horas de desabafo que sempre me escutou com tanto carinho. Por sempre me incentivar a continuar quando tudo parecia não dar certo e pela amizade que criamos juntas.

Agradeço em especial a minha melhor amiga Fernanda Bianchi Pereira da Costa que nestes últimos dois anos se fez tão presente na minha vida que se tornou a minha irmã de alma, companheira de trabalho. Agradeço a Deus por insistir em trilhar nossos caminhos juntas, hoje entendendo o motivo de termos nos reencontrado. Começamos juntas e vamos terminar juntas estes trabalhos.

Agradeço as minhas amigas que moram em Alegrete (Priscila e Gabriela) que mesmo a distância sempre se fizeram tão presentes na minha vida.

Agradeço aos colegas de trabalho do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) pelo bom convívio e amizade neste período de aprendizado, somos uma família.

Agradeço as amigas Tamara Baggio e Priscila Correa pela amizade que conquistamos nesta fase de estudo.

Agradeço de todo o meu coração aos bolsistas (Kássio Stein, Michael Parisotto, Livia Zoppas, Vitor Linhares, Lucas Aragão, Gabriel Galvan, Matheus Bier, Giovane Ávila e Vinicius Silveira) e especialmente a Taís Junges que se tornou uma amiga tão especial, que me auxiliaram na execução deste trabalho, sem vocês nada disso poderia ter sido realizado.

Agradeço aos demais bolsistas que me ajudaram nesta caminhada mesmo que indiretamente contribuíram para a execução deste trabalho.

Agradeço ao Seu José, nosso querido auxiliar que sempre esteve pronto para ajudar a aliviar o peso das concretagens, auxiliar em tudo que estivesse ao seu alcance.

Agradeço a Empresa CAAL (Alegrete/RS) pela disponibilidade da cinza da casca de arroz.

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

Muito Obrigada!

A resiliência é a capacidade de se recuperar de situações de crise e aprender com ela. É ter a mente flexível e o pensamento otimista, com metas claras e a certeza de que tudo passa.

*Autor Desconhecido*

## RESUMO

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

O compósito cimentício de elevada capacidade de deformação é um tipo especial de compósito cimentício de alto desempenho reforçado com fibras, cuja principal característica é a alta ductilidade, devido à capacidade de gerar fissuração múltipla quando em carregamento. Este compósito também é conhecido como *Engineered Cementitious Composite (ECC)*, desenvolvido pelo Pesquisador Professor Victor Li na Universidade de Michigan, nos Estados Unidos. Nos últimos cinco anos, o Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) vem desenvolvendo uma linha de pesquisa com o objetivo de adaptar o ECC com materiais locais. Neste intuito, fibras de polipropileno têm sido utilizadas em conjunto com cinza da casca de arroz visando o desenvolvimento de misturas mais viáveis economicamente e mais ambientalmente sustentáveis. Este estudo teve como finalidade avaliar a possibilidade da utilização da cinza de casca de arroz residual (moída em laboratório por 1, 2, 4, 6 e 8 horas) como material pozolânico para substituição parcial de cimento. A caracterização da cinza foi realizada por meio dos ensaios de difração de raio-x, fluorescência de raio-x, perda ao fogo, índice de desempenho, massa específica e distribuição granulométrica. Este estudo caracterizou compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação contendo 10%, 20% e 30% (em volume) de substituição de cimento por cinza de casca de arroz residual, analisando o comportamento mecânico quanto à tração direta e flexão a quatro pontos. Na busca de um indicativo de durabilidade foram avaliados a absorção e índice de vazios destes compósitos. Além disso, foi realizada a análise da curva de liberação de calor de hidratação para verificar o efeito retardador que a cinza de casca de arroz possa gerar no compósito. E como possível utilização deste compósito como material de reparo, foi analisada a aderência pelo método de cisalhamento oblíquo e pelo método de arrancamento e avaliada a reflexão de fissuras juntamente com a realização de microscopia eletrônica de varredura destes compósitos. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios para os compósitos com 30% de cinza de casca de arroz moída por 8 e 4 horas, apresentando bons resultados quanto à ductilidade e resistência à propagação de fissuras.

Palavras-chave: compósito; cinza de casca de arroz; fibras de polipropileno.

## ABSTRACT

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

The high strain cementitious composite is a special type of fiber reinforced high performance cementitious composite which main characteristic is the high ductility achieved through the ability to generate multiple cracking under loading. This composite is also known as Engineered Cementitious Composites (ECC), which was first developed by Professor Victor Li at the University of Michigan, in the United States. Over the last five years, the Laboratory of Testings and Structural Models (LEME) of UFRGS has developed a research area aiming to adapt ECC with local materials. In this context, polypropylene fibers were used to substitute PVA fibers and rice husk ash was used to partially replace cement, aiming to develop more cost attractive and greener mixtures. This study analyzed the use of non-processed rice husk ash (grinded in laboratory for 1, 2, 4, 6 and 8 hours) as a pozzolanic material by means of x-ray diffraction tests, x-ray fluorescence, fire loss, performance index, specific mass and particle size distribution. This study characterized, in terms of mechanical behavior, the high strain cementitious composites with 10%, 20% and 30% (by volume) of non-processed rice husk ash as cement replacement. The experimental tests were carried out in terms of direct tensile and four points bending tests. Aiming to obtain a first indication of durability, absorption and void rate tests were performed. Other tests were performed to obtain the hydration heat curve aiming to determine a possible retarding effect that the rice husk ash may cause to the composite. Finally, in order to analyze the use of the composite as a reinforcement material, tests were carried out to obtain the bond behavior in terms of oblique shear and pullout methods. The reflection of cracks was also evaluated along with scanning electron microscopy of the composites. The results were satisfactory for composites with 30% of rice husk ashes grinded for 8 and 4 hours, presenting good results in terms of ductility and resistance to crack propagation.

Key-words: composite; rice husk ash; polypropylene fiber.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	20
1.2 JUSTIFICATIVA .....	21
1.3 OBJETIVOS .....	23
1.3.1 Objetivo Geral: .....	23
1.3.2 Objetivos específicos: .....	23
1.4 DELINEAMENTO .....	24
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	25
<b>2 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO.....</b>	<b>27</b>
2.1 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO .....	27
2.2 O SURTIMENTOS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	28
2.2.1 Características das Matrizes Cimentícias .....	30
2.2.2 A Incorporação de Fibras .....	31
2.2.3 Interação Fibra-Matriz.....	32
2.2.4 Comportamento Mecânico dos Compósitos.....	35
2.3 ADIÇÕES DE MATERIAIS POZOLÂNICOS EM COMPÓSITOS.....	36
2.3.1 Definição de Pozolanas .....	37
2.3.2 Classificação das Pozolanas .....	37
2.3.3 Características e Comportamento das Pozolanas em Materiais Compósitos .....	38
<b>3 CINZA DE CASCA DE ARROZ.....</b>	<b>40</b>
3.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA .....	43
3.3 INFLUÊNCIA DO GRAU DE MOAGEM NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA .....	47
3.4 POZOLANICIDADE DA CCA .....	49
3.5 EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DA CCA EM COMPÓSITOS .....	51
<b>4 COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO</b>	<b>54</b>
4.1 ORIGEM DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO .....	54
4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO .....	55
4.3 APLICAÇÕES DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO .....	58
4.4 ADIÇÕES POZOLÂNICAS NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO .....	61

<b>5 MÉTODO DE PESQUISA .....</b>	<b>68</b>
5.1 MATERIAIS .....	69
5.1.1 Cimento Portland.....	69
5.1.2 Água de Amassamento .....	70
5.1.3 Agregado Miúdo.....	70
5.1.3.1 Areia Fina .....	70
5.1.3.2 Areia Média .....	71
5.1.4 Agregado Graúdo .....	71
5.1.5 Aditivo Superplastificante .....	72
5.1.6 Cinza de Casca de Arroz oriunda da Queima Sem Controle de Temperatura .....	72
5.1.7 Fibras de Polipropileno.....	73
5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA CCA .....	74
5.2.1 Difração de Raios-X (DRX) .....	74
5.2.2 Fluorescência de Raios X (FRX).....	74
5.2.3 Perda ao Fogo .....	74
5.2.4 Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle .....	75
5.2.5 Massa específica .....	75
5.2.6 Distribuição Granulométrica .....	75
5.3 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA.....	76
5.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM CCA.....	77
5.4.1 Tração Direta .....	77
5.4.2 Flexão a Quatro Pontos .....	78
5.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	79
5.5.1 Absorção e Índice de Vazios .....	80
5.5.2 Curva de Liberação de Calor de Hidratação.....	81
5.5.3 Aderência Pelo Método de Arrancamento ( <i>pull-off test method</i> ).....	82
5.5.4 Aderência Pelo Método de Cisalhamento Oblíquo .....	84
5.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	87
<b>6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>89</b>
6.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ ..	89
6.1.1 Fluorescência de Raios X (FRX).....	89
6.1.2 Difração de Raio-X.....	90
6.1.3 Perda ao Fogo .....	91
6.1.4 Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias, em Relação ao Controle ...	92
6.1.5 Massa específica .....	93
6.1.6 Distribuição Granulométrica .....	93
6.2 CARACTERÍSTICA MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM CCA .....	94
6.2.1 Tração Direta .....	97
6.2.2 Flexão a Quatro Pontos .....	104
6.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES .....	116

6.3.1 Absorção e Índice de Vazios .....	116
6.3.2 Curva de Liberação de Calor de Hidratação.....	118
6.3.3 Aderência pelo Método de Arrancamento.....	120
6.3.4 Aderência pelo Método de Cisalhamento.....	123
6.3.5 Reflexão de Fissuras .....	129
6.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	137
<b>8 CONCLUSÕES.....</b>	<b>139</b>
8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	139
8.2 CONCLUSÕES .....	140
8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	141
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>143</b>
<b>APÊNDICE A – Gráficos de Tração Direta.....</b>	<b>151</b>
<b>APÊNDICE B – Gráficos de Flexão a Quatro Pontos - Lateral.....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICE C – Gráficos de Flexão a Quatro Pontos - Flecha.....</b>	<b>157</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas da pesquisa.....	24
Figura 2 - Concepção dos comportamentos <i>strain-softening</i> e <i>strain-hardening</i> sob tensões de tração uniaxial .....	30
Figura 3 – Interação fibra-matriz .....	34
Figura 4- Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b) . .....	34
Figura 5 – Curva tensão x deformação do material compósito .....	35
Figura 6 - Vista de um aterro com cinza de casca de arroz residual . .....	41
Figura 7 - Cinza de casca de arroz (CCA) após moagem (a) cristalina (b) amorfa .....	45
Figura 8 - Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA cristalina.. .....	45
Figura 9 - Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA amorfa. ....	46
Figura 10 - Tempo de moagem x índice de pozolanicidade.....	47
Figura 11 - Fixação da portlandita pela CCA, (a) traço controle (b) traço CR (c) Traço CC ..	51
Figura 12 - Características morfológicas e físicas da cinza de casca de arroz provenientes de diferentes processos de queima . .....	51
Figura 13 - Diagrama de resistência à compressão x tempo . .....	52
Figura 14 - Curva de tensão x deformação – flexão a quatro pontos . .....	56
Figura 15 – Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação. ....	56
Figura 16 – Curvas de tensão x deformação de corpos de prova ensaiados a tração direta. ....	57
Figura 17 – Aparência das seções reparadas da ponte após a execução (a) e após cinco anos de exposição ao tráfego e condições ambientais (b). ....	58
Figura 18 – Curvas tensão-deformação dos sistemas de recapeamentos estudados por Kamada e Li (2000). ....	59
Figura 19 - Montagem do ensaio de reflexão de fissuras . .....	60
Figura 20 - Curva tensão de flexão - deflexão no meio do vão de vigas compostas por um substrato de concreto fissurado e recapeamento de concreto convencional e ECC .....	60
Figura 21 – Situação de pilares ensaiados – (a) concreto convencional (b) ECC .....	61
Figura 22 - Curvas de tensão x deformação de corpos de prova com o uso de cinza volante - ensaiados a tração direta. ....	62
Figura 23 – Tensão x deformação de ECCs com combinações de cinza volante e escória de alto-forno em diferentes idades. ....	63

Figura 24 - Curvas tensão x deformação de tração uniaxial para misturas com IOTs aos 28 dias (a) IOTs-fina (b) IOTs-400 (c) IOTs-600 (d) IOTs-1180. ....	64
Figura 25 – Curvas de força x deflexão de misturas com adições pozolânicas aos 28 dias – (a) cinza volante (b) escória de alto forno (c) combinação de cinza volante com escória (d) combinação de cinza volante com sílica ativa. ....	65
Figura 26 - Calor de hidratação da pasta de cimento de referência (0%) em relação às pastas com adição de 5%; 15% e 25% de aciaria elétrica ao longo do tempo (horas). ....	66
Figura 27 – Esquema do programa experimental. ....	68
Figura 28 – Cinza de casca de arroz obtida do processo de queima sem controle de temperatura. ....	72
Figura 29 - Moinho de bolas utilizado para a moagem da CCA. ....	73
Figura 30 – Fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa. ....	73
Figura 31 – Processo de moldagem dos compósitos (a) materiais secos; (b) mistura após a adição de água e aditivo; (c) mistura com fibra de polipropileno; (d) moldagem. ....	77
Figura 32 – (a) Dimensões do corpo de prova; (b) corpo de prova moldado; (c) corpo de prova durante ensaio de tração direta. ....	78
Figura 33 – (a) Dimensões do corpo de prova; (b) corpo de prova moldado; (c) corpo de prova durante o ensaio de flexão. ....	79
Figura 34- Etapa de execução do ensaio de absorção e índice de vazios – Fervura por 5 horas. ....	80
Figura 35– Moldagem das amostras. ....	81
Figura 36 – Posição dos termopares na amostra para ensaio de curva de liberação de calor, (a) posição dos termopares na fôrma com 100% do volume utilizado; (b) e na fôrma com 50% do volume utilizado. ....	81
Figura 37– Ensaio de liberação de calor de hidratação. ....	82
Figura 38– Esquema do ensaio de arrancamento. ....	84
Figura 39 – Etapas do ensaio (a) cortes com o diâmetro de 50 mm; (b) colagem dos discos com resina epóxi. ....	84
Figura 40– Esquematização do corpo de prova para ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo. ....	85
Figura 41 - Processo de mapeamento de fissuras no corpo de prova misto. ....	85
Figura 42– Configuração do corpo de prova para resistência à fissuração refletiva. ....	87
Figura 43 - Ensaio de reflexão de fissuras; (a) corpo-de-prova instrumentado; (b) posicionamento do LVDT. ....	87

Figura 44 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	88
Figura 45– Difração de raio-x das amostras de CCA – (a) CCA 1 hora de moagem (b) CCA 2 horas de moagem (c) CCA 4 horas de moagem (d) CCA 6 horas de moagem (e) CCA 8 horas de moagem.....	91
Figura 46– Curva granulométrica das amostras de CCA (a) 1 hora de moagem (b) 2 horas de moagem (c) 4 horas de moagem (d) 6 horas de moagem (e) 8 horas de moagem. ....	94
Figura 47 - Cálculo do coeficiente (a) área 1 (b) área 2.....	96
Figura 48 – Indicativo de ductilidade dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no ensaio de tração direta. ....	102
Figura 49 - Curvas tensão x deformação do ensaio de tração direta (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.....	103
Figura 50 - Indicativo de ductilidade dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no ensaio de flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na lateral do corpo de prova. ....	108
Figura 51 - Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na lateral (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.....	109
Figura 52 - Indicativo de ductilidade dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no ensaio de flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na vertical para medição da flecha. ....	113
Figura 53 – Curva tensão x deslocamento do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na vertical (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.....	115
Figura 54- (a) Absorção (b) Índice de vazios.....	117
Figura 55 - Curva de Liberação de Calor de Hidratação – (a) Termopar no centro no volume de 1,8 litros (b) Termopar na extremidade no volume de 1,8 litros. ....	118
Figura 56 - Curva de Liberação de Calor de Hidratação – Termopar Central Volume 0,91 litros.....	119
Figura 57 - Temperatura máxima encontrada no ensaio de Liberação de Calor de Hidratação. ....	120
Figura 58 - Ensaio de Aderência por Arrancamento (a) Ensaio em execução e (b) Ruptura de arrancamento na interface resina/compósito. ....	121
Figura 59 - Lixamento do compósito no intuito de regularizar a superfície. ....	122
Figura 60 - Arrancamento na interface compósito/concreto (a) Compósito 2 cm (b) Compósito 3 cm. ....	122
Figura 61 - Resistência à compressão dos compósitos.....	124

Figura 62 - Aderência pelo método de cisalhamento oblíquo. ....	125
Figura 63 - Mapeamento de fissura do elemento misto: compósito referência/concreto. ....	126
Figura 64 - Corpos de prova rompidos - compósito-REF/concreto. ....	126
Figura 65 - Mapeamento de fissuras do elemento misto: compósito com 30% de CCA 8h/concreto. ....	127
Figura 66 - Corpos de prova rompidos - compósito-30%8h/concreto. ....	127
Figura 67 - Mapeamento de fissuras do elemento misto: compósito com 30% de CCA 4h/concreto. ....	128
Figura 68 - Corpos de prova rompidos - compósito-30%4h/concreto. ....	128
Figura 69 - Reflexão de fissuras: compósito com altura de 2 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h. ....	130
Figura 70 – Corpo de prova fissurado após ter sido submetido ao ensaio de flexão a quatro pontos. ....	131
Figura 71 - Fissuração na região da junta existente no concreto da viga composta por compósito/concreto com altura de 2 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h. ....	131
Figura 72 – Reflexão de fissuras: compósito com altura de 3 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h. ....	133
Figura 73 – Fissuração na região da junta existente no concreto da viga composta por compósito/concreto com altura de 3 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h. ....	134
Figura 74 - Reflexão de fissuras: compósito com altura de 5 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h. ....	136
Figura 75 - Fissuração na região da junta existente no concreto da viga composta por compósito/concreto: altura de 5 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h. ....	137
Figura 76 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. ....	138

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades de diversos tipos de fibras (BENTUR; MINDESS, 1990).....	32
Tabela 2- Estrutura cronológica do conhecimento sobre CCA (TIBONI, 2007).....	42
Tabela 3 - Composição química de várias CCAs (SENSALE, 2006).....	50
Tabela 4 - Composição do cimento CP V (Fonte: Brennand Cimentos, 2014).....	69
Tabela 5 - Composição granulométrica da areia fina e massa específica. ....	70
Tabela 6 – Caracterização granulométrica da areia média e massa específica (agregado miúdo).....	71
Tabela 7 – Caracterização granulométrica da brita e massa específica.....	71
Tabela 8 – Características da fibra (GARCEZ, 2009).....	74
Tabela 9 – Dosagem do traço referência. ....	76
Tabela 10 – Estratégia experimental – tração direta.....	78
Tabela 11 – Estratégia experimental – flexão à quatro pontos.....	79
Tabela 12 – Nomenclatura adotada na fase 4 da dissertação. ....	80
Tabela 13– Estratégia experimental – absorção e índice de vazios.....	80
Tabela 14- Traço de Concreto para Pavimentos.....	83
Tabela 15– Estratégia experimental – aderência pelo método de arrancamento.....	83
Tabela 16– Estratégia experimental – ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo. ....	85
Tabela 17– Estratégia experimental – ensaio de reflexão de fissuras. ....	86
Tabela 18 - Fluorescência de raio-X das CCAs estudadas.....	89
Tabela 19 – Requisitos mínimos da NBR 12653 (ABNT, 2014).....	90
Tabela 20 – Perda ao fogo das amostras de CCA.....	92
Tabela 21 - Índice de desempenho da CCA. ....	92
Tabela 22 – Massa específica das amostras de CCA.....	93
Tabela 23 - Caracterização mecânica - tração direta. ....	99
Tabela 24 – Caracterização mecânica – flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na lateral. ....	105
Tabela 25 - Caracterização mecânica – flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na vertical (flecha).....	111
Tabela 26 - Limites estabelecidos pela NBR 13749.....	123

## LISTA DE EQUAÇÕES

$C_3S + H_2O \rightarrow C-S-H + CH$ (Equação 1).....	49
$SiO_2$ (da CCA) + $CH + H_2O \rightarrow C-S-H$ (Equação 2).....	49
$Coeficiente = A_2' = (A_1 + A_2)A_1$ (Equação 3) .....	95



# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o tema de estudo proposto para a dissertação, iniciando com uma breve contextualização, seguindo das justificativas, objetivos e delineamento da pesquisa.

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A utilização de concretos especiais vem crescendo com a finalidade de minimizar as limitações dos concretos convencionais ou de incorporar propriedades não inerentes a esse tipo de material. Além disso, são empregados em locais e/ou condições em que o uso do concreto convencional não é satisfatório.

Nos últimos anos, concretos especiais com o uso de fibras poliméricas têm sido objeto de estudos de alguns pesquisadores, termo este que é normalmente utilizado para denominar o conjunto formado por fibras e pela matriz de cimento que integra o concreto ou argamassa. Os compósitos mais empregados são aqueles a base de cimento utilizados sob forma de concreto com fibras, de argamassa armada (ferrocimento) e de cimento amianto (fibrocimento) (FIGUEREDO, 2002).

O grupo de pesquisa do ACE-MRL (*Advanced Cementitious Materials – Materials Research Laboratory*) da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos desenvolveu um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação reforçado com fibra denominado de *Engineered Cementitious Composites*, também chamado de ECC (LI, 2003). Esses compósitos possuem uma adição máxima de 2% de fibras poliméricas em relação ao volume total e foram projetados para resistir a altas tensões de tração e elevadas tensões de cisalhamento.

O ECC apresenta uma alta capacidade de deformação pós-pico de carregamento denominado *strain-hardening* e pelo desenvolvimento de um processo de múltipla fissuração, resultando em um compósito de comportamento bastante dúctil (GARCEZ, 2009).

Segundo Li (2003), o comportamento *strain-hardening* é o responsável pelo desenvolvimento de múltipla fissuração devido à transferência de tensões entre as fibras no compósito. Após a fissuração, a carga aplicada é transferida para a fibra, que por sua vez transfere a carga para

outro ponto da matriz cimentícia, criando assim uma nova fissura. Este processo se repete continuamente e é responsável pela alta ductilidade do material.

A produção dos compósitos de elevada capacidade de deformação geralmente necessita maior quantidade de cimento, em torno de duas a três vezes mais que em concretos convencionais. Em Michigan, o Professor Li testou o uso de cinza volante como pozolana no ECC, a fim de reduzir a quantidade de cimento nas misturas de ECC e de proporcionar melhorias no comportamento do material, como apresentado nos trabalhos de Wang e Li (2007) e Yang *et al.* (2007). Li (2003) menciona que a tenacidade (tenacidade é uma medida da quantidade de energia que o compósito pode absorver antes de fraturar, expressa, numericamente, pela área sob a curva tensão versus deslocamento) da matriz deve ser controlada de modo que o grampeamento exagerado das fibras não seja provocado, o que impediria que o compósito desenvolvesse o comportamento *strain-hardening*. Segundo o autor, a adição de cinza volante, por exemplo, é fundamental para que se possa atingir este comportamento, por ajudar no controle da tenacidade da matriz. Como a reação pozolânica da cinza ocorre de forma mais lenta do que a hidratação das partículas do clínquer, sua presença proporciona uma evolução mais suave da resistência e tenacidade em idades iniciais, ao mesmo tempo em que resulta em ganhos de resistência em idades avançadas.

No Brasil, poucos estudos foram realizados com este compósito cimentício de elevada capacidade de deformação. Um trabalho de grande destaque é a tese de doutorado desenvolvida por Estela Garcez em 2009, que utilizou fibras de polipropileno no ECC no intuito de verificar o seu desempenho mecânico para recapeamento de pavimentos. Nos últimos cinco anos, o Laboratório de Ensaio e Modelos estruturais (LEME/UFRGS) vem consolidando um grupo de pesquisas visando o desenvolvimento deste compósito, no intuito de estudar este compósito e adaptá-lo aos materiais locais. Este estudo visa contribuir com o avanço do estudo da utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz para criar misturas mais ambientalmente sustentáveis e mais viáveis economicamente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que a utilização de materiais pozolânicos interfere nas propriedades físico-mecânicas de argamassas e concretos, contribuindo, principalmente, para o aumento da resistência à compressão em idades mais elevadas, para a diminuição da permeabilidade e para o aumento da durabilidade (TASHIMA, 2006).

Esses materiais pozolânicos geralmente são resíduos provenientes de outros setores produtivos, como é o caso da cinza de casca de arroz. A utilização de CCA como material suplementar ao cimento já vem sendo investigada por vários autores com resultados promissores, mostrando-se, inclusive, uma alternativa interessante na produção de concretos de alto desempenho (CORDEIRO, 2009).

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que cada tonelada de arroz em casca produz cerca de 200 kg de casca, e quando em combustão origina 40 kg de cinza. A CCA possui um elevado teor de sílica (90 a 95%) em sua composição química. Devido a esse valor alto, a cinza de casca de arroz pode ser aplicada em diversas aplicações como na construção civil (pozolana agregada em cimentos, concretos e argamassas, fabricação de tijolos prensados e estabilização de solos), na indústria cerâmica (processo de obtenção de refratários, porcelanas e isolantes térmicos) e na fabricação de vidros (CESAR, 2011).

A substituição parcial da cinza de casca de arroz no concreto tem sido estudada há vários anos por pesquisadores, entre eles Mehta (1994) revisado em (2014), Isaia (1995), Isaia e Gastaldini (2009), Tashima (2006) e Santos (2008), sendo que, a cada ano, novas pesquisas estão sendo realizadas.

Em Michigan, o Professor Li testou o uso de cinza volante como pozolana no ECC, como já mencionado anteriormente. A adição da cinza volante melhorou significativamente o comportamento da tenacidade da matriz cimentícia. Desta maneira, a abordagem utilizada no presente trabalho baseia-se na possibilidade da utilização da cinza de casca de arroz sem beneficiamento como material suplementar ao cimento (substituição parcial) no estudo do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação (ECC). Além disso, este trabalho também terá como base a utilização de fibras de polipropileno, fabricadas no Brasil, ao invés das fibras de PVA, de fabricação americana e não disponíveis no mercado brasileiro, originalmente utilizadas pelo Professor Li (2003). Com o uso da CCA espera-se uma possível redução de custos e uma minoração das emissões dos CO<sub>2</sub>, trazendo benefícios ambientais sem comprometer o comportamento mecânico do material, especialmente a elevada ductilidade e conseqüente capacidade de múltipla fissuração.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral:

O objetivo geral desta dissertação é verificar a viabilidade do uso da cinza de casca de arroz sem beneficiamento (moída em laboratório) e fibra de polipropileno em compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.

### 1.3.2 Objetivos específicos:

Esta dissertação tem os seguintes objetivos específicos:

- Na busca de analisar se a cinza de casca de arroz se enquadra como material pozolânico e se atende os requisitos mínimos da NBR 12653 (ABNT, 2014) é verificada as características físicas e químicas da cinza por meio dos ensaios de: fluorescência de raios-x; difração de raios-x (DRX), perda ao fogo, granulometria a laser, índice de atividade pozolânica e massa específica;
- Estudar as porcentagens de substituição de cimento por cinza de casca de arroz nas porcentagens de 10%, 20% e 30% (em volume de cimento) para encontrar o teor de substituição ideal nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação;
- Analisar o tempo de moagem ideal (considerando os tempos de 1, 2, 4, 6 e 8h) da cinza de casca de arroz sem beneficiamento para que a mesma obtenha resultados satisfatórios;
- Na busca de se obter um compósito com CCA que desenvolva o comportamento *strain-hardening* é investigado o comportamento mecânico quanto à tração direta e flexão a quatro pontos;
- Para analisar o possível efeito retardador que a CCA possa proporcionar nos compósitos, no intuito de diminuir as retrações térmicas é investigada a curva de liberação de calor de hidratação nestes compósitos;
- Como primeiro indicativo de durabilidade é analisado a absorção e índice de vazios dos compósitos cimentícios com CCA;
- Considerando uma situação em que o compósito possa ser utilizado como material de reparo é investigado a aderência do compósito cimentício com concreto convencional através dos ensaios de aderência por arrancamento e aderência por cisalhamento

- Como possível material de reparo é investigado a capacidade do compósito cimentício de resistir à fissuração por reflexão;
- Na busca de entender a microestrutura dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação e a interação fibra-matriz é investigado com o auxílio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura.

#### 1.4 DELINEAMENTO

O trabalho foi desenvolvido de acordo com as etapas apresentadas no fluxograma apresentado na Figura 1.

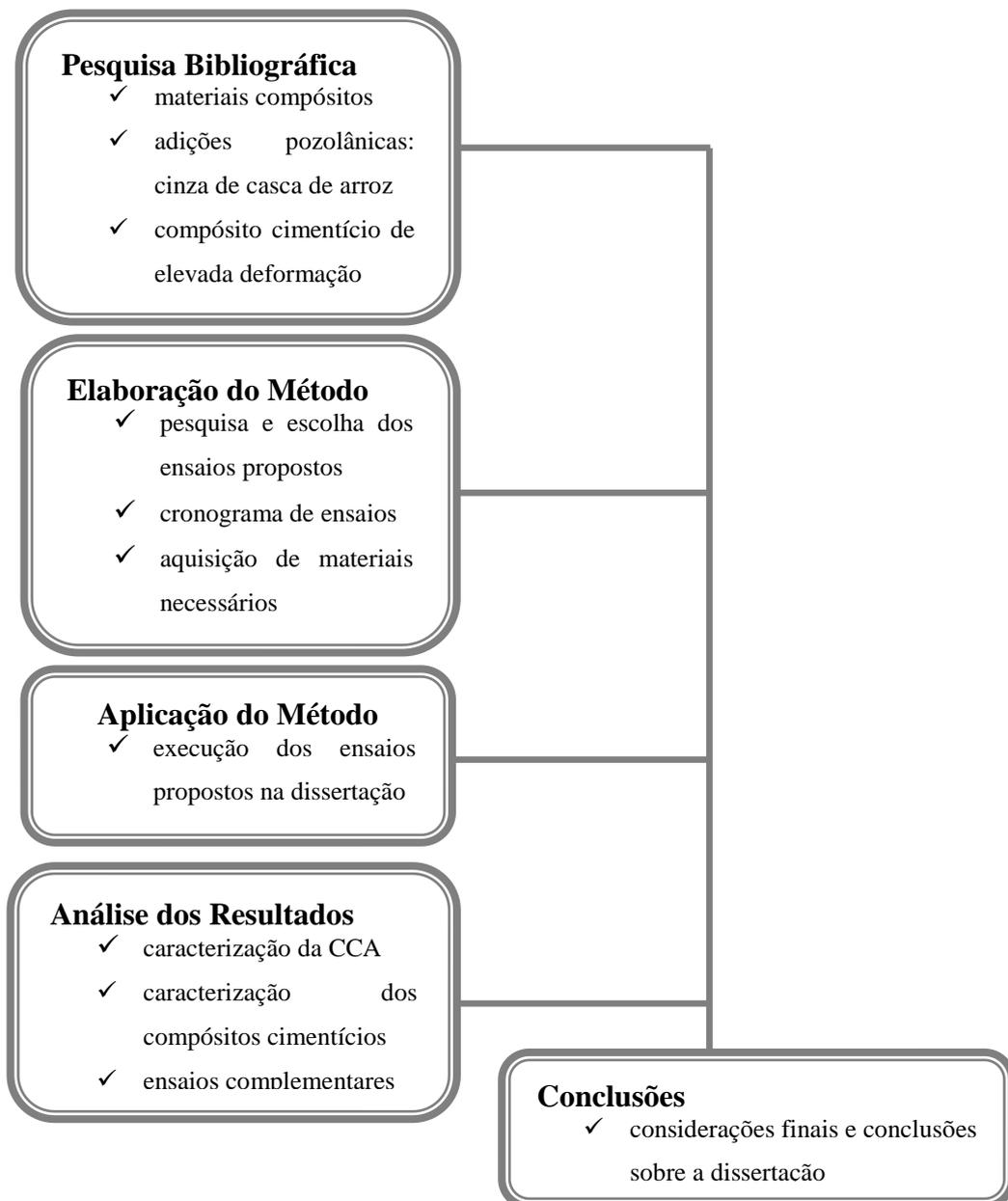


Figura 1 – Etapas da pesquisa.

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

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

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

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

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

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

O capítulo 2 apresenta uma revisão geral sobre o desenvolvimento de novos materiais na construção civil, abordando principalmente o uso de fibras em concretos especiais. O capítulo 3 aborda a potencialização da cinza de casca de arroz no ramo da construção civil, com suas propriedades, vantagens e desvantagens, juntamente com seu potencial pozolânico.

No capítulo 4 são abordados os fundamentos teóricos dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, sua criação, vantagens e desvantagens, suas principais propriedades e seu comportamento. O capítulo 5 detalha o método de pesquisa utilizado neste trabalho, apresenta todos os materiais e procedimentos utilizados nos ensaios para a realização desta pesquisa.

O capítulo 6 é denominado análise dos resultados e traz os resultados obtidos, juntamente com a análise entre os compósitos cimentícios estudados e determinação do traço com melhor desempenho mecânico.

O capítulo 7 é reservado à apresentação das conclusões derivadas do desenvolvimento da dissertação, com indicações e recomendações para trabalhos futuros.

Ao final, encontra-se anexada a lista de referências bibliográficas utilizadas neste trabalho, bem como os anexos da pesquisa.

## **2 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ALTO DESEMPENHO**

Este capítulo apresenta uma revisão sobre a origem dos compósitos cimentícios e suas características, incluindo temas como os fatores que influenciam no desempenho da técnica de adição de fibras, citando características das matrizes cimentícias e das fibras, interação fibra-matriz. Também é apresentando a adição de materiais pozolânicos neste material, com suas características e suas vantagens no uso.

### **2.1 EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DO CONCRETO**

Nas últimas décadas, a evolução da tecnologia do concreto vem ocorrendo de maneira muito rápida, esta evolução é propiciada pelo surgimento de novos materiais e aditivos químicos, e se dá pela limitação dos concretos convencionais que muitas vezes não atendem as necessidades das obras, pelo modo que precisam ser empregados e também pelas situações em que o concreto convencional não é satisfatório (WATANABE, 2008).

Os concretos convencionais têm como principais deficiências a baixa relação entre resistência/peso, a possibilidade de retração plástica, baixa ductilidade e pode apresentar uma certa permeabilidade em ambientes úmidos. Visando diminuir essas deficiências, pesquisadores estão desenvolvendo novos concretos, chamados concretos especiais. Segundo Figueiredo *et al.* (2004), os concretos especiais são concretos com características particulares que melhoram as deficiências do concreto convencional ou incorporam propriedades não inerentes ao concreto.

Propondo melhorias nas características de durabilidade do concreto, muitos materiais estão sendo investigados, como o desenvolvimento de aditivos químicos de elevado desempenho, a utilização de fibras de aço e polipropileno e principalmente a utilização de adições minerais com características de pozolanicidade como a sílica ativa, metacaulim, cinza volante e cinza de casca de arroz (WATANABE, 2008).

## 2.2 O SURGIMENTOS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

Pela definição de Jones (1975) apud Campello (2013), os compósitos são formados pela união de dois ou mais materiais, que mantêm individualmente as suas características anteriores à união, com obtenção de uma interface bem definida. Desse modo, através da combinação destes materiais, é possível obter compósitos com melhores propriedades mecânicas do que os materiais originais, podendo promover um aumento da rigidez, da tenacidade e da resistência em condições especiais.

Higgins (1994) classifica os materiais compósitos em dois grupos, denominados de materiais compósitos particulados e fibrosos, os compósitos particulados são materiais adicionados a uma matriz em forma de partícula, já os compósitos fibrosos são em forma de fibras.

Conforme Lameiras (2007) os materiais compósitos são formados por apenas duas fases, uma denominada de matriz que é contínua e envolve a outra fase, chamada de fase dispersa. Tecnicamente, os compósitos mais usados são aqueles em que a fase dispersa encontra-se na forma de fibras, trazendo benefícios ao compósito como elevada resistência mecânica e/ou rigidez em relação a sua massa (CALLISTER JR, 2002).

A adição de fibras é usada desde o tempo dos egípcios, a palha era usada para reforçar tijolos de barro. Mehta e Monteiro (2014) citam a existência de evidências que postes eram confeccionados com argila e fibras de asbesto há cerca de 5.000 anos.

Um compósito de matriz cerâmica, muito conhecido, é o material à base de cimento Portland. Neste compósito a fase denominada como matriz é a constituição dos agregados ligados pela pasta de cimento hidratada (LAMEIRAS, 2007). Os materiais baseados em cimento Portland são uma opção ideal para a aplicação de fibras, melhorando assim suas propriedades como ductilidade, resistência à tração e flexão.

Os primeiros compósitos da união da matriz cimentícia com a fibra são os *fibre reinforced concrete* conhecidos pela sigla FRC. Os autores Bentur e Mindess (1990) definem os FRC como um material contendo uma base de cimento hidráulico e fibras discretas e descontínuas (aço, poliméricas e carbono), sem agregados incorporados nesta mistura, esses compósitos também são conhecidos pela sigla FRCC (*Fiber Reinforced Cement Composites*). Este tipo de compósito quando submetidos a esforços de tração sofre uma diminuição da tensão após o aparecimento da primeira fissura, ou seja, apresentam um amolecimento da matriz, conhecido

pelo comportamento *strain-softening*. Naaman (2008) caracteriza este comportamento *strain-softening* como uma perda da capacidade resistente progressiva após a primeira fissuração da matriz.

Novos estudos desenvolveram uma nova classe de compósitos dúcteis de alto desempenho reforçado com fibras, conhecidos como DFRCC (*Ductile Fiber Reinforced Cement Composites*). Estes compósitos apresentam um comportamento de endurecimento com formação de múltiplas fissuras na flexão, este comportamento é conhecido como *strain-hardening*. O comportamento *strain-hardening* tem a abertura de fissura em deformações baixas e o controle da múltipla fissuração é difícil, dependendo exclusivamente das condições de cargas associadas (NAAMAN, 2002).

Na busca de suprir as deficiências que os compósitos obtinham em tensão de tração uniaxial foi concebida nos últimos anos uma classe nova de compósitos de nominados de HPFRCC (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*). O diferencial destes compósitos é o endurecimento sob deformação e acompanhado da múltipla fissuração. Este comportamento ficou conhecido como *strain-hardening*, ou seja, é a resistência pós-fissuração na tração uniaxial é maior ou igual à resistência de fissuração.

Um grande exemplo dessa classe de compósitos é o ECC – *Engineered Cementitious Composites*, desenvolvidos pelo Professor Victor Li na Universidade de Michigan, a característica mais dominante neste tipo de compósito é o comportamento de *strain-hardening* sob-tensões de tração uniaxial atribuídos com o desenvolvimento da múltipla fissuração (NAAMAN, 2002). Este tipo de compósito terá um capítulo à parte sobre seu desenvolvimento e suas características devido a ser o foco desta dissertação.

A Figura 2 ilustra a diferença entre os comportamentos *strain-softening* e *strain-hardening*, onde se pode perceber que a após a abertura da primeira fissura os dois comportamentos começam a ser exibidos. O comportamento *strain-softening* após a abertura da primeira fissura perde sua capacidade de suportar carregamento (tensões), já o comportamento *strain-hardening* após a abertura da primeira fissura tem a capacidade de suportar o carregamento, mantendo o nível de tensão gerando um patamar de deformação pós primeira fissura.

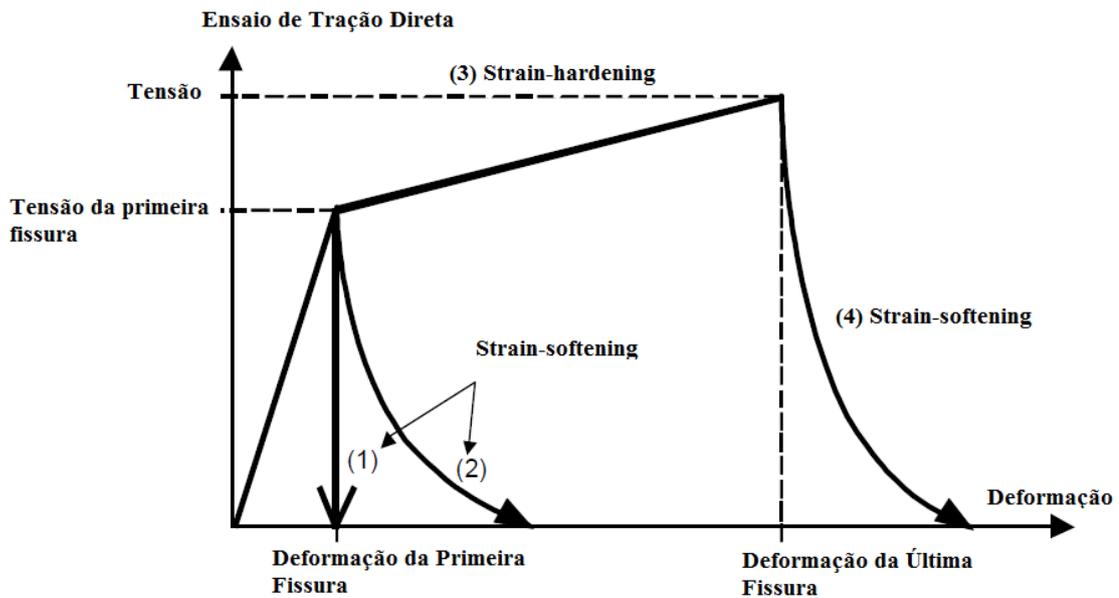


Figura 2 - Concepção dos comportamentos *strain-softening* e *strain-hardening* sob tensões de tração uniaxial (JSCE, 2008).

Atualmente, os compósitos cimentícios reforçados com fibras são utilizados em diversas aplicações onde é necessário materiais com boa resistência à tração estática ou dinâmica e que tenham elevada capacidade de absorver energia. Em muitas situações o concreto não é mais produzido sem a incorporação de fibras à matriz, como é o caso de alguns pavimentos de concreto para aeroportos, telhas de concreto, tubulões, revestimento de túneis, entre tantos outros (LAMEIRAS, 2007). A diminuição da fissuração por retração, aumento da ductilidade, resistência ao impacto e resistência à fadiga são outras vantagens que levaram ao crescimento do uso de fibras no ramo da construção civil.

### 2.2.1 Características das Matrizes Cimentícias

Nos compósitos cimentícios reforçados com fibras, a matriz atua como uma transmissora e distribuidora de tensões para a fibra, e apenas uma proporção muito pequena de tensões é absorvida pela matriz. Outra função das matrizes é proteger as fibras contra danos superficiais, como resultado da abrasão mecânica e ataques químicos (LAMEIRAS, 2007).

Savastano Jr. (2003) descreve as matrizes cimentícias como composições de aglomerantes minerais e de agregados, originando pastas, argamassas e concretos. Essas matrizes cimentícias têm como característica uma ruptura frágil, apresentando uma resistência à tração limitada. Mehta e Monteiro (2014) explicam que a ruptura ocorre, no caso do concreto,

quando submetido a tensões externas, originando um aumento das microfissuras existentes na zona de transição entre a pasta e os agregados graúdos, ficando suscetível ao rompimento.

O concreto quando submetidos a esforços de tração apresentam uma resistência bem inferior à resistência a compressão, cuja relação é, geralmente, em torno de 7% e 11%. Esta baixa resistência pode estar associada a sua grande dificuldade de interromper a propagação das fissuras quando é submetido a tensões de tração (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Outra característica considerada intrínseca às matrizes cimentícias, é a alta porosidade. Além das fases sólidas da matriz, esta contém diferentes tipos de vazios, o que acaba influenciando diretamente nas suas propriedades. Vazios interlamelares, vazios capilares e o ar incorporado ou aprisionado são os principais tipos de vazios nas matrizes cimentícias. A quantidade de vazios e a distribuição do tamanho dos poros são influenciadas principalmente pela relação água/cimento, grau de adensamento e tipos e quantidade dos materiais constituintes (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Para almejar propriedades específicas no compósito, é comum que sejam realizadas modificações na matriz cimentícia, utilizando adições pozolânicas, como a cinza de casca de arroz, superplastificantes e/ou polímeros (LAMEIRAS, 2007).

### 2.2.2 A Incorporação de Fibras

As características como o tipo, massa específica, resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação na ruptura, teor de adição e o grau de aderência das fibras com a matriz cimentícia, afetam o comportamento mecânico do compósito.

Conforme Nivaldo *et al.* (2012), a fissuração da matriz frágil é reduzida com a adição de fibras. Isto ocorre porque as fissuras são interligadas pelas fibras e, como resultado, dá-se um aumento na tenacidade e na resistência à tração e ao impacto. A forma como essas propriedades são modificadas depende do tipo de matriz, das propriedades físicas e geométricas das fibras e da interação entre a fibra e a matriz.

Bernardi (2003) justifica estudar as fibras em separado devido ao fato que cada tipo de fibra contribui diferentemente com a melhoria das propriedades dos compósitos cimentícios. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades para diversos tipos de fibras usadas.

Tabela 1- Propriedades de diversos tipos de fibras (BENTUR; MINDESS, 1990).

Fibra	Diâmetro Equivalente ( $\mu\text{m}$ )	Massa Específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
Acrílico	18	1,18	0,4 - 1,0	14 - 19,5	3
Aço	5 - 500	7,84	0,5 - 2,0	190 - 210	0,5 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,4	2	3 - 3,5	10 - 200	2 - 3
Carbono	9	1,9	2	230	1
Celulose	-	1,2	0,3 - 0,5	10	-
Fibra de Madeira	-	1,5	0,9	71	-
Nylon	-	1,1	0,9	4	13 - 15
Polietileno	-	0,95	$0,7 \times 10^{-3}$	0,3	10
Polipropileno	20 - 200	0,9	0,5 - 0,75	5 - 7,7	8
Sisal	10 - 50	1-50	0,8	-	3
Vidro	9 - 15	2	2,04	70 - 80	2 - 3,5

Conforme o módulo de elasticidade, as fibras podem ser divididas em dois grupos. O primeiro onde as fibras possuem módulo de elasticidade menor que as matrizes cimentícias, como por exemplo, fibra de celulose, náilon; e o segundo por fibras com módulos elevados como fibras de amianto, vidro, aço e aramida (LAMEIRAS, 2007).

Outro fator de grande importância é o teor de fibra adicionado nas matrizes cimentícias. Em princípio, quanto maior o teor de fibras melhor será o desempenho, pois maior será o número de fibras que intercepta cada microfissura, evitando a propagação das mesmas. Em contrapartida também se sabe que a incorporação de altos teores de fibras pode causar problemas de perda de trabalhabilidade. Mehta e Monteiro (2014) propuseram uma classificação para os compósitos, em função da fração volumétrica adicionada de fibra, dividida em três grupos: baixa fração volumétrica (<1%); fração volumétrica média (entre 1% e 2%) e alta fração volumétrica (maior que 2%). Os compósitos cimentícios com baixa fração volumétrica são utilizados para reduzir fissuras de retração. Os compósitos com fração volumétrica moderada são utilizados para aumentar o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto.

### 2.2.3 Interação Fibra-Matriz

O comportamento de uma matriz cimentícia reforçada com fibras está ligado à interação fibra-matriz, que ocorre na zona de transição, a interface fibra-matriz desenvolve uma função muito importante na transmissão da tensão entre as duas fases, no aumento da energia de fratura do compósito e no deslocamento das fissuras. Sabe-se que a zona de transição é o ponto de maior fragilidade, que afeta propriedades como a resistência mecânica e a durabilidade dos compósitos (COUTTS (1988) apud BASSI (2010)).

Bentur e Mindess (1990) cita que existe basicamente dois tipos de mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras citadas a seguir:

- Transferência de tensões elástica: é o mecanismo dominante antes de ocorrer qualquer tipo de fissuração na matriz. Nesta etapa, os deslocamentos longitudinais da fibra e da matriz na interface são geometricamente compatíveis. A tensão que se desenvolve na interface é uma tensão cisalhante a qual é requerida para distribuir o carregamento externo entre as fibras e a matriz, então as deformações destes dois componentes na interface permanecem as mesmas. Esse processo de transferência de tensões cisalhantes é o mecanismo que influencia na tensão de surgimento da primeira fissura do compósito;
- Transferência de tensões por fricção devido ao deslizamento: ocorre em estágios mais avançados de carregamento, quando começa a ocorrer o deslocamento ao longo da interface fibra-matriz. Neste caso ocorrem deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz, é este modo de transferência de tensões que controla as resistências e deformações últimas do compósito.

Os autores Bentur e Mindess (1990) ainda citam que a ocorrência de cada uma das etapas de transferência de tensões depende da resistência de aderência entre a fibra e a matriz e da resistência à tração da matriz. Se a resistência à tração da matriz for elevada, espera-se que ocorra um deslocamento na interface entre a fibra e a matriz quando a tensão de cisalhamento elástico ultrapassar a resistência de aderência entre os dois materiais, anteriormente a fissuração da matriz. Já nos compósitos constituídos de matrizes com baixas resistências à tração, a fissuração precede o deslocamento da fibra com relação à matriz. Neste caso, o arrancamento da fibra se dá como resultado do avanço de uma fissura em sua direção.

A Figura 3 ilustra resumidamente as fibras absorvendo energia e controlando o crescimento das fissuras da matriz. Da direita para a esquerda tem se várias etapas da interação fibra-matriz: o processo de fissuração da matriz, propagação destas fissuras em direção às fibras e consequente deslocamento da interface matriz-fibra, costura das fissuras promovida pelas fibras, deslizamento das fibras e por fim a falha das fibras.

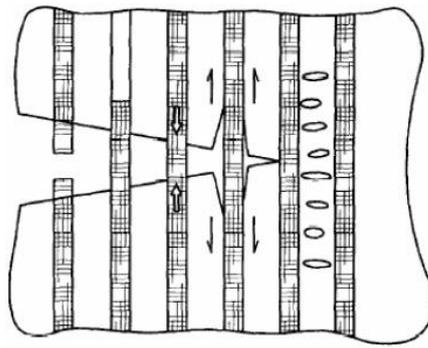


Figura 3 – Interação fibra-matriz (ANDERSON, 1991 apud ZOLLO, 1997).

Figueiredo (2011) ilustra na Figura 4 dois concretos, um com fibras e outro sem, e o comportamento que ocorre quando os dois são submetidos à tração. Para o autor no concreto sem fibras, uma fissura proporciona uma barreira à propagação de tensões de tração, representadas pelas linhas de tensão. Como pode se observar na Figura 4 (a) existe um desvio das linhas de tensão implicando numa concentração de tensões nas extremidades da fissura, e no caso de essa tensão superar o valor da tensão crítica, ocorrerá à ruptura do material.

A Figura 4 (b) demonstra um concreto com adição de fibras, onde se percebe uma grande redução da velocidade de propagação das fissuras no compósito, que passa a ter um comportamento não frágil. Assim, com a utilização de fibras, pode ser obtida uma menor fissuração do concreto.

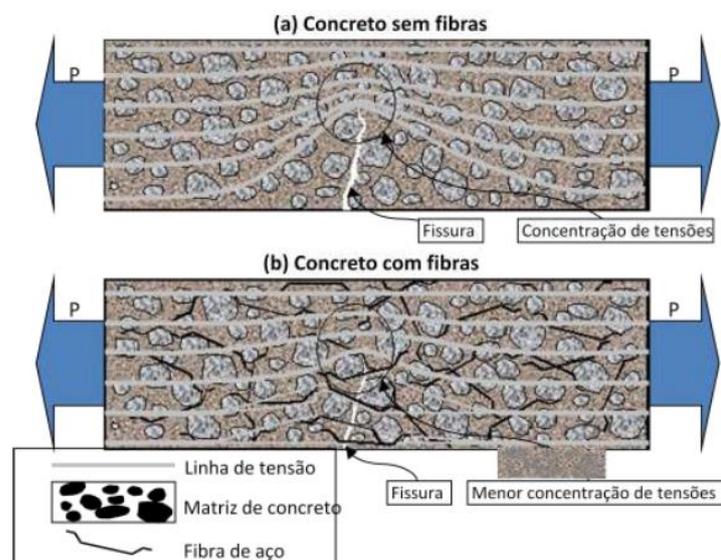


Figura 4- Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b) (FIGUEIREDO, 2000).

Uma das características que proporciona melhoria na matriz do compósito é o fato das fibras se distribuírem aleatoriamente no material, reforçando toda a peça, e não em uma única posição, como ocorre com as armaduras convencionais. Este fato se torna interessante para o caso de estruturas contínuas, como é o caso dos pavimentos, onde as tensões de tração variam de posição na peça ao longo de um dia. Isto ocorre devido às variações de temperatura que o pavimento sofre, aquecendo a superfície superior ao longo do dia e resfriando durante a noite (FIGUEIREDO, 2011).

## 2.2.4 Comportamento Mecânico dos Compósitos

Um modelo simples que ajuda a compreender o comportamento mecânico dos compósitos é o ACK proposto por Aveston *et al.* em 1971 apud Bentur e Mindess (1990). Neste modelo o comportamento mecânico pode ser descrito em termos de três estágios de curva tensão-deformação: intervalo elástico, múltipla fissuração e estágio pós-múltipla fissuração. Estes estágios podem ser visualizados na Figura 5.

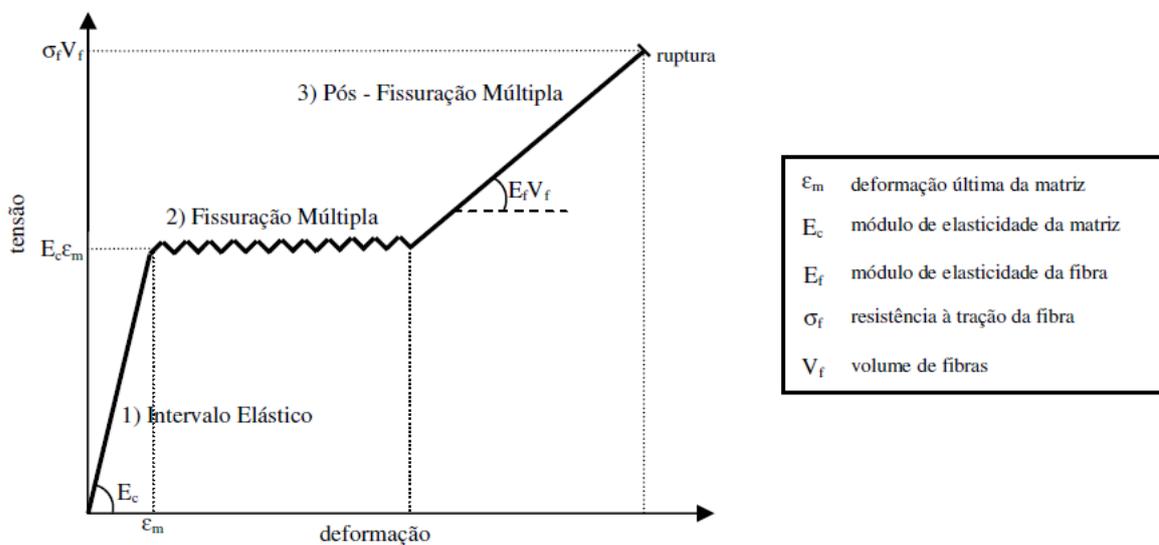


Figura 5 – Curva tensão x deformação do material compósito (AVESTON *et al.* (1971) apud BENTUR E MINDESS (1990).

O primeiro estágio denominado elástico corresponde ao intervalo antes do aparecimento da primeira fissura, onde a fibra e a matriz trabalham juntas. A múltipla fissuração tem seu início assim que a fissuração da matriz ocorre e a carga é transferida para as fibras. A primeira fissura que ocorre no compósito não leva a uma falha brusca da estrutura e sim resulta em uma redistribuição do carregamento entre a matriz e as fibras. Ao serem submetidas a cargas adicionais, novas fissuras são abertas, até que a matriz se dividida em um certo número de

segmentos separado por fissuras. Este processo de múltipla fissuração é extremamente importante, uma vez que ele controla a capacidade de absorção de energia do material (tenacidade). Cada nova fissura aberta provoca uma deformação plástica do compósito seguida de um enrijecimento que resulta em um módulo de elasticidade inferior ao da configuração anterior. E por fim o último processo é o de pós-múltipla fissuração, este processo se desenvolve quando não há mais a ocorrência da múltipla fissuração e a matriz está dividida por fissuras paralelas, e qualquer incremento de tensão adicional provoca solicitação nas fibras ou causa o deslizamento das mesmas (BENTUR E MINDESS, 1990).

A múltipla fissuração oferece muitos benefícios aos compósitos e para que essa múltipla fissuração se desenvolva é importante ter o controle da tenacidade da matriz de modo a não provocar o grampeamento exagerado das fibras, para isso uma opção viável é o uso de adições pozolânicas nestes compósitos. A reação pozolânica que as pozolanas proporcionam favorecem para uma evolução mais suave da resistência e da tenacidade nas idades iniciais, e ao mesmo tempo em que resulta em ganhos de resistência em idades avançadas.

### 2.3 ADIÇÕES DE MATERIAIS POZOLÂNICOS EM COMPÓSITOS

Desde o surgimento do homem, a busca por abrigo tornou-se uma necessidade básica e, com isso o desenvolvimento de materiais, apropriados para a construção, tornou-se parte da história. Dentre os materiais descobertos, a argila, a cal, o gesso e a pedra revelaram-se materiais com incríveis possibilidades construtivas (CORDEIRO, 2009).

Relatos acerca das primeiras construções desenvolvidas pelo homem, de aproximadamente 10.000 anos, indicam que os egípcios foram pioneiros no desenvolvimento de materiais ligantes. A cal surge posteriormente, descoberta, ao que tudo indica, pela civilização grega e torna-se um aglomerante muito difundido ao longo da história das civilizações (ALVES, 2002; BARSOUM; GANGULY, 2006).

A evolução das construções pode, sob diversos aspectos, ser avaliada como cíclica, com hábitos que vêm com o decorrer dos anos. Babilônicos, egípcios, gregos, entre outros povos, utilizaram materiais com características pozolânicas em épocas e regiões diferentes. Com a descoberta do cimento Portland estes materiais entraram em desuso, mas hoje a engenharia vive um novo ciclo no que diz respeito ao uso de pozolanas, especialmente porque o mercado

consumidor se faz exigente com relação à aplicação de materiais sustentáveis (COOK, 1986 apud CORDEIRO, 2009; SANTOS, 2008).

A origem do nome pozolana deve-se ao fato de que as cinzas vulcânicas mais famosas foram encontradas próximo ao Monte Pozzuoli, Itália. Com a descoberta de novos materiais naturais que ao reagir com a cal apresentavam propriedades cimentícias, o termo pozolana passou a ser utilizado de forma mais abrangente (TASHIMA, 2006).

Segundo Cordeiro (2009) o termo pozolana inclui não somente cinzas vulcânicas, mas também resíduos industriais, tais como: cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz e diversos outros materiais. O termo pozolana é empregado para todos os materiais, sejam eles naturais ou artificiais, desde que apresentem características de formar compostos cimentantes.

### 2.3.1 Definição de Pozolanas

Segundo Massazza, (1998), originalmente, o termo pozolana era atribuído aos materiais naturais de origem vulcânica, com propriedades similares aos da cidade italiana de Pozzuoli, que reagem com a cal, em presença de água, à temperatura ambiente. Com o decorrer do tempo, a definição foi estendida a outros materiais que, embora de origens diversas, exibem comportamento semelhante.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), pozolana é um material que, por si só, possui pouco ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades cimentantes.

Conforme Tashima (2006), as pozolanas podem ser utilizadas tanto no processo de fabricação do cimento, na substituição de uma parte do clínquer, ou ainda, na produção de argamassas e concretos. No Brasil é muito comum ocorrerem essas duas utilizações, assim, reduzindo a extração das jazidas de calcário e argila, com o intuito de preservar os recursos naturais não-renováveis.

### 2.3.2 Classificação das Pozolanas

As pozolanas dividem-se em dois grandes grupos: naturais e artificiais.

De acordo com Cordeiro (2009), as pozolanas naturais derivam-se de rochas ou minerais vulcânicos, passando por vários processos de britagem, moagem, classificação e,

normalmente, são ativados termicamente. A utilização das pozolanas naturais proporcionam reduções consideráveis no consumo de energia para a fabricação do cimento Portland. Essa redução aumenta quando a pozolana é utilizada em porcentagem de substituição ao cimento Portland.

As pozolanas artificiais são resíduos ou subprodutos industriais, oriundas de diversas fontes, nas quais possuem diferentes características, mas tendo em comum a atividade pozolânica. As pozolanas artificiais mais empregadas na construção civil são as cinzas volantes, as escórias de alto forno e a sílica ativa. Porém, diversas pesquisas vêm sendo realizadas com o uso de cinza de casca de arroz, tais como as de Tashima (2006), Cordeiro (2009) e Pouey (2006), com o intuito de introduzir outros resíduos como substituição ao cimento Portland que são o bagaço de cana-de-açúcar e a cinza de casca de arroz (TASHIMA, 2006).

Mehta e Monteiro (2014), classificam as adições minerais em duas categorias de pozolanas:

- pozolana altamente reativa - quando queimada em processo controlado e constituída essencialmente de sílica pura, na forma não cristalina e em estrutura celular;
- pozolana pouco reativa - quando queimada em campo e constituída essencialmente de silicatos cristalinos, com uma pequena quantidade de matéria não cristalina, indicando que este material deve ser moído e reduzido a um pó muito fino, para desenvolver certa atividade pozolânica.

### 2.3.3 Características e Comportamento das Pozolanas em Materiais Compósitos

A preocupação com a durabilidade das estruturas, o aumento da produção de concretos de elevada resistência e o interesse na destinação adequada de resíduos vêm tornando, cada vez mais frequente o uso de pozolanas em matrizes cimentícias.

Pode-se separar a atuação das pozolanas nas matrizes cimentícias em dois efeitos: efeito químico, também conhecido como atividade pozolânica, e efeito físico. No que se refere ao efeito químico, à atividade pozolânica inclui todas as reações químicas que acontecem entre os elementos ativos das pozolanas, a cal e a água (METHA e MONTEIRO, 2014).

Sabe-se que as pozolanas reagem com a portlandita, (CH) formada na hidratação do cimento, gerando produtos de hidratação resistentes. O processo de reação da pozolana com o hidróxido de cálcio contribui para a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H),

aluminatos de cálcio hidratados (A-C-H) e/ou silicoaluminatos de cálcio hidratados (S-A-C-H) gerando, assim, um aumento de resistência mecânica, diminuição da permeabilidade e, também, um aumento na durabilidade (CORDEIRO, 2009).

O efeito físico da pozolana, conhecido como efeito fíler, atua no preenchimento de vazios das matrizes cimentícias, melhorando a coesão e diminuindo a exsudação. O efeito fíler e o efeito de nucleação estão diretamente relacionados com a distribuição granulométrica das pozolanas (CORDEIRO, 2009).

Por ser o foco principal desta pesquisa, será abordado com mais detalhes no próximo capítulo o uso da cinza de casca de arroz em matrizes cimentícias.

### 3 CINZA DE CASCA DE ARROZ

A tecnologia moderna está intimamente ligada ao desenvolvimento de materiais alternativos, onde, a premissa básica é à busca do desenvolvimento sustentável. A indústria da construção civil depara-se com grande potencial na inserção dos resíduos como materiais de construção, tornando-os como produtos, reduzindo problemas relacionados aos aspectos ambientais e sociais, através da utilização de sistemas de reciclagem e da busca da sustentabilidade dos processos de produção (BARBOSA, 2006). Segundo Prudêncio Jr. *et al.* (2003) a incorporação de resíduos industriais ao concreto, tais como a cinza de casca de arroz (CCA), pode ser uma importante forma de conduzi-la a uma finalidade nobre, ambientalmente correta, tornando uma das soluções para o aproveitamento de subprodutos poluentes.

Por definição, a casca de arroz é um revestimento ou capa protetora formada durante o crescimento do grão, de baixa densidade e elevado volume. É um material fibroso, cujos maiores constituintes são celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%) (HOUSTON, 1972 apud POUHEY, 2006). A lignina e a celulose podem ser removidas através de uma combustão controlada, obtendo-se assim uma cinza rica em sílica de forma microporosa. De acordo com Della (2005), o resíduo inorgânico obtido após a queima da casca contém, em média, 90% de sílica, bem como óxidos de potássio, magnésio, sódio, cálcio, ferro, fósforo, manganês e alumínio, os quais são analisados como impurezas.

A composição química da cinza e a sua atividade pozolânica está diretamente relacionada com o processo de combustão da casca. Sua coloração pode variar desde um branco rosado até um negro, dependendo do teor de carbono contido na cinza. Trata-se de um material considerado, por diversos pesquisadores (CORDEIRO, 2009; POUHEY, 2006; ISAIA *et al.*, 2010; RODRIGUES; BERALDO, 2010), como uma fonte alternativa de obtenção de sílica amorfa e de alto grau de reatividade.

A cinza de casca de arroz tem sido bastante pesquisada nos últimos 20 anos, principalmente a partir dos estudos que Mehta e Monteiro (1994) revisado em 2014, com colaboradores que desenvolveram estes estudos na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Muitos países, principalmente os asiáticos, têm empregado a cinza de casca de arroz amorfa no cimento ou concreto, pois, na Ásia, há grande produção de arroz e, por consequência, existe uma necessidade em se utilizar a cinza como material cimentício.

Segundo a ONU (2014), a produção mundial do arroz em 2014 chegou a 500 milhões de toneladas, sendo 90% do arroz cultivado e consumido na Ásia. O Brasil ocupa lugar de destaque no cenário internacional, sendo o maior produtor fora do continente asiático, com produção acima de 11 milhões de toneladas, representando 2% do total mundial e 50% da América Latina.

O Rio Grande do Sul, na safra 2013/2014, produziu 8,11 milhões de toneladas de arroz, representando 64% da produção nacional, que foi de 12,163 milhões de toneladas. No sul do Brasil, boa parte da casca de arroz é aproveitada para abastecer as caldeiras de indústrias cerâmicas e para gerar energia em usinas termoelétricas. A casca queimada produz uma elevada quantidade de cinzas, representando cerca de 20% da massa da casca de arroz (CONAB, 2014). Esta cinza gerada ainda é considerada um resíduo agroindustrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartada ou lançada em aterros, o que gera problemas ambientais, tais como poluição de mananciais de água, do ar e do solo. A Figura 6 apresenta a foto de um aterro na cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul, em uma zona próxima a um conjunto habitacional de um populoso bairro do município (POUEY, 2006).



Figura 6 - Vista de um aterro com cinza de casca de arroz residual (POUEY, 2006).

Grande parte das pesquisas realizadas no Brasil para uso da CCA em concreto tem utilizado cinza com a maior reatividade possível, para possibilitar maiores ganhos de resistência e de durabilidade. Apesar deste elevado número de estudos visando à aplicação da CCA, atualmente, a maior parte da CCA residual ainda é simplesmente descartada. O seu efetivo emprego na construção civil encontra restrições por motivos tais como sua cor escura e a falta de uniformidade apresentada em termos de características mineralógicas. São poucos os estudos que utilizam a CCA residual, sem controle de queima, como as pesquisas

desenvolvidas por Dafico (2001) – UFB -, Isaia; Gastaldini (2009) – UFSM –, Silva (2009) – UnB-, Prudêncio Jr. (2002) – UFSC-, Dal Molin (1995) – USP-, entre outros.

Como já foi observado anteriormente, pesquisas científicas envolvendo a casca de arroz e seu subproduto, a cinza de casca de arroz, já vêm sendo realizadas há muitos anos. Tiboni (2007) apresentou uma revisão histórica dos principais trabalhos que formam a estrutura cronológica do conhecimento a respeito da cinza de casca de arroz e a partir dela a Tabela 2 foi elaborada.

Tabela 2- Estrutura cronológica do conhecimento sobre CCA (TIBONI, 2007).

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

Recentemente, importantes trabalhos de notável relevância foram desenvolvidos com cinza de casca de arroz no Brasil, como por exemplo: Rego (2004), Cordeiro (2006), Tashima (2006), Pouey (2006), Santos (2006), Tiboni (2007), Silva (2007).

### 3.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE QUEIMA NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA

Estudos como Silva *et al.* (2007), Nair *et al.* (2008) e Isaia *et al.* (2010) comprovam que as propriedades da CCA estão fortemente ligadas às temperaturas de queima da casca de arroz. O aumento da temperatura de queima promove as transformações de fases de sílica contida na cinza de casca de arroz, influenciando diretamente na quantidade de sílica reativa.

De acordo com Cordeiro (2009), outro fator de influência é o tipo de forno em que a cinza é gerada. Esse pode favorecer, ou não, a produção de sílica amorfa. Um forno do tipo fluidizado, comparado a um forno comum, possui mais vantagens na produção de cinza de casca de arroz amorfa devido às características peculiares dos leitos fluidizados que, em geral, apresentam inexistência de gradientes de temperatura, de pontos muito ativos ou de regiões estagnadas.

Associada à temperatura e ao tipo de forno, a taxa de aquecimento e o tempo de exposição na temperatura desejada completam os fatores que regem as características físicas e químicas das CCA produzidas (TIBONI, 2007).

É sabido que a queima sem controle da casca de arroz fornece como produto a CCA rica em sílica, normalmente na forma cristalina. Se submetida à queima controlada, a sílica pode ser amorfa, caracterizada por uma alta reatividade (CORDEIRO, 2009).

Segundo Cook (1986) apud Cordeiro (2009), com relação às transformações estruturais que regem a formação de cinzas amorfas e/ou cristalinas, tem-se que inicialmente ocorre a perda de massa em temperaturas de até 100°C, resultando na evaporação da água absorvida. A cerca de 350°C ocorre a ignição do material mais volátil, dando início à queima da casca de arroz. Entre 400 e 500°C, o carbono residual é oxidado, sendo neste estágio observada a perda de massa mais substancial. Após esta etapa, a cinza é rica em sílica amorfa. O emprego de temperaturas acima de 600°C pode levar à formação de quartzo, e níveis mais elevados de

temperatura podem acarretar na formação de outras formas cristalinas. Acima de 800°C, a sílica presente na CCA é essencialmente cristalina.

Nair *et al.* (2008) observaram que de acordo com algumas técnicas como, análises químicas (Absorção por Massa Atômica, Fluorescência de Raio-X), formação de silicato de cálcio hidratado (Difração de Raio-X), medidas de condutividade elétrica, ressonância magnética nuclear e microscopia eletrônica de varredura, que a temperatura considerada ótima para a formação de CCAs reativas devem estar na faixa de 500°C a 700°C.

Silva (2009) ainda lista outros ensaios que se é possível analisar a pozolanicidade da CCA:

- a) Análises Químicas (Absorção por Massa Atômica, Fluorescência de Raio-X).
- b) Teor de Vidro (Difração de Raio-X, Microscópio Óptico).
- c) Finura (Granulometria a laser, Área Específica por Absorção de nitrogênio – BET).
- d) Método de Chapelle (Método Químico que mede o consumo de CaO livre).
- e) Resistência Mecânica (Argamassa e Concreto).
- f) Análise Termogravimétrica (Mede o consumo de Ca(OH)<sub>2</sub>).
- g) Formação de silicato de cálcio hidratado (Difração de Raio-X).
- h) Liberação de Calor (Calorímetro de Lagavant).
- i) Medidas de Condutividade Elétrica.
- j) Porosimetria por Intrusão de Mercúrio.
- k) Ressonância Magnética Nuclear.
- l) Análises através de Microscopia Eletrônica de Varredura.

Estudos realizados revelam que as cinzas apresentam morfologias diferentes conforme a temperatura de queima. Dentre eles, Barbosa *et al.* (2006) estudaram a influência do tempo e da temperatura na queima da casca de arroz. Como resultados (Figura 7), apresentam uma cinza com controle de queima, com temperatura de aproximadamente 600°C, Figura 7(b); e

outra cuja queima processou-se por autocombustão sem controle de queima, tal processo durou 36 horas, tendo uma temperatura de até 850°C, Figura 7(a).



(a) cristalina

(b) amorfa

Figura 7 - Cinza de casca de arroz (CCA) após moagem (a) cristalina (b) amorfa (BARBOSA, *et al.* 2006).

Ainda nesses estudos, Barbosa *et al.* (2006) realizou o ensaio de difração de raio X, nos dois tipos de cinzas obtidas. É possível observar a presença de cristais, principalmente, a cristobalita e a tridimita na cinza cristalina (Figura 8), enquanto que, na cinza amorfa, não ocorrem picos (Figura 9).

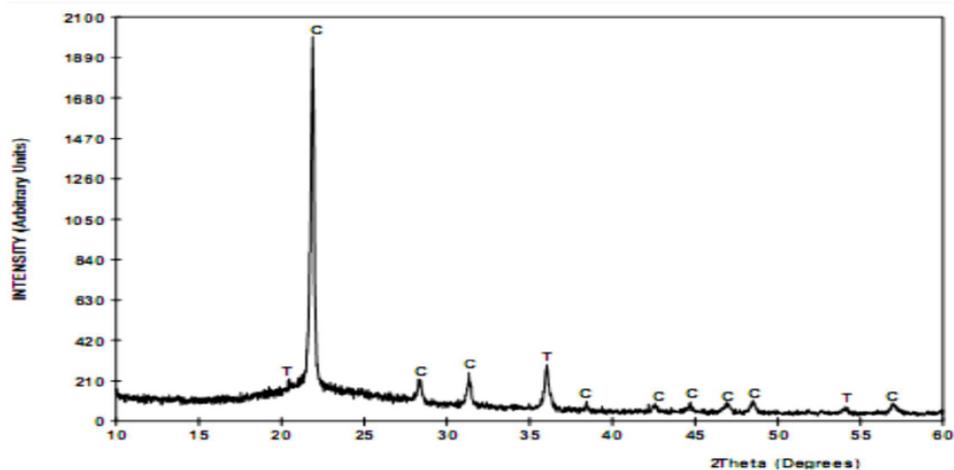


Figura 8 - Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA cristalina. (BARBOSA *et al.* 2006).

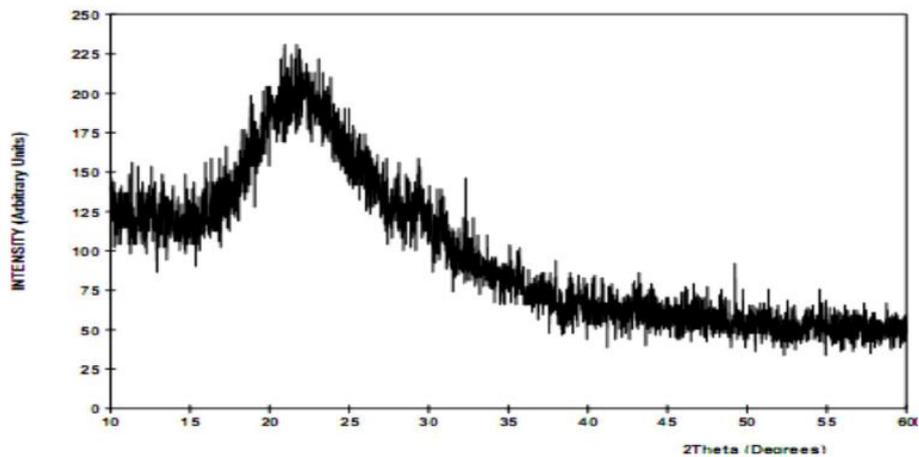


Figura 9 - Resultado do ensaio de difração de raio-x CCA amorfa. (BARBOSA *et al.* 2006).

De acordo com Pitt (1976) apud Cordeiro (2009), é necessário elevar a temperatura para valores acima de 1000 °C para que ocorra a transformação de estado amorfo para cristalino na sílica pura. Entretanto, durante a queima da casca de arroz, a mudança de forma estrutural da sílica amorfa ocorre geralmente em temperaturas inferiores a 1000°C, dada a presença de outros constituintes na casca.

Krishnarao *et al.* (2001) atribuíram a aceleração da cristalização da sílica amorfa em cristobalita a fusão do potássio na superfície da cinza da casca de arroz, pois quando o óxido de potássio se dissocia (346,85°C), forma o elemento potássio que tem ponto de fusão de 63,65°C causando um derretimento da superfície da casca e acelerando a cristalização da sílica amorfa em cristobalita.

Além do potássio, outras impurezas podem interferir na pozolanicidade da cinza de casca de arroz, pois elas impedem a liberação do carbono durante a calcinação. Ele pode ficar aprisionado dentro da fase líquida formada na superfície das partículas da cinza pela dissociação e posterior fusão dos óxidos metálicos fundentes (SILVA, 2009).

De acordo com Metha e Monteiro (2014) a cinza residual é classificada como pozolana pouco reativa, então se sugere que este material seja moído até se obter um pó fino para que possa ter atividade pozolânica.

### 3.3 INFLUÊNCIA DO GRAU DE MOAGEM NAS CARACTERÍSTICAS DA CCA

O grau de moagem, em conjunto com as condições de queima, é um dos fatores que influenciam nas características das CCA. Trata-se de uma operação que é capaz de modificar as propriedades físicas da cinza de casca de arroz, tais como a superfície específica e finura (CORDEIRO, 2009).

Conforme Cordeiro (2009), a moagem consiste na fragmentação de uma estrutura sólida, quando submetida a esforços mecânicos, aplicados por elementos que provocam deformação das partículas, a ponto de conferir maior compacidade à mistura. Essa moagem pode ser realizada a seco, ou a úmido, dependendo do material a ser moído e do processo subsequente.

Prudêncio Jr (2003) constatou que, na medida em que se aumenta o tempo de moagem, a pozolanicidade também aumenta devido ao tamanho da partícula que diminui. No entanto, em moagens prolongadas esse efeito não se mantém, atribuindo à dificuldade na dispersão dessas partículas muito finas na argamassa, tal qual demonstra a Figura 10.

A finura da casca de arroz influencia a sua reação com a água. Geralmente, quanto mais fino o cimento, mais rapidamente ele reagirá. No entanto, existem limites para a finura, devido ao calor de hidratação; com isso, partículas menores do que 45  $\mu\text{m}$  são difíceis de hidratar, e aquelas maiores do que 75  $\mu\text{m}$  nunca se hidratam completamente. A adição de cinza de casca de arroz, ao concreto, provoca um aumento significativo na resistência à compressão, devido ao refinamento dos poros e dos grãos e pela melhoria na microestrutura da zona de transição (SILVA, 2007).

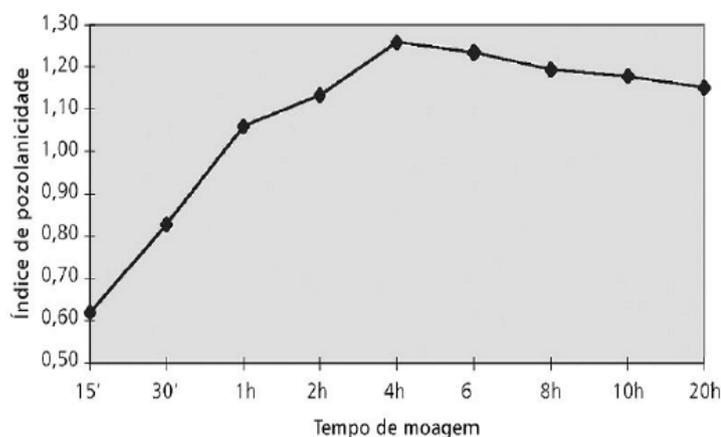


Figura 10 - Tempo de moagem x índice de pozolanicidade. (SANTOS, 1997).

Prudêncio e Santos (1996) demonstraram que o índice de atividade pozolânica (IAP) da CCA residual aumenta com o tempo de moagem (aumento da superfície específica) até o limite de quatro horas. Após este tempo, há um decréscimo no índice, apesar de a superfície específica continuar aumentando. Este comportamento inesperado talvez possa ser atribuído ao fato de que o aumento da superfície específica dificulta a dispersão da cinza na argamassa/concreto. As partículas da cinza acabam formando grupos que não reagem na sua totalidade com a  $\text{Ca(OH)}_2$  liberada no processo de hidratação do cimento.

Segundo Frizzo (2001), comparando-se as misturas com mesma pozolana, cinza volante e cinza de casca de arroz, verificou-se que o aumento na finura, ao mesmo tempo em que aumentou a resistência à compressão axial, reduziu a penetração média de cloretos. Este comportamento ocorreu devido ao aumento na finura das adições minerais que proporcionaram melhor preenchimento dos espaços capilares grandes, resultando em maior densificação da microestrutura da pasta e impermeabilidade do concreto.

Pouey (2006) produziu cimentos diferentes com distintas CCAs submetidas a tratamentos físicos, térmicos e químicos. A autora afirmou que, em termos de resistência à compressão, o tratamento físico (redução da granulometria) foi o que produziu maiores benefícios. Ficou clara a influência da CCA no seu desempenho, ou seja, até o limite de  $4,55 \mu\text{m}$  testado, quanto menor foi a granulometria, maior foi a pozolanicidade da CCA e, por consequência, a resistência à compressão dos compósitos. Ainda de acordo com a autora, para cimentos 50% passantes inferiores a  $6\mu\text{m}$ , obtidos pelo moinho “periquito<sup>1</sup>”, parece haver uma padronização do comportamento. Quando desconsiderados o tipo de CCA e tipo de tratamento empregado, todas as CCAs atingiram IAP acima do limite mínimo estabelecido pelas normas brasileiras e os cimentos atingiram bom desempenho.

Seguindo a mesma tendência, Cordeiro (2009) afirmou que os estudos de moagem desenvolvidos com a cinza residual da casca de arroz possibilitaram verificar que a moagem ultrafina foi adequada para conferir elevada atividade pozolânica ao material. Dentre os procedimentos investigados pelo autor, as moagens efetuadas por períodos de 120 e 240 minutos em moinho vibratório conduziram às cinzas de maior atividade pozolânica, na avaliação tanto por método mecânico quanto por método químico.

---

<sup>1</sup> Moinho Periquito – é um moinho composto por dois jarros com capacidade de 1000 ml cada um dos jarros. Na moagem utiliza-se uma relação 5:1 (bolas esféricas de alumina: massa de material) em cada jarro.

Assim, tem-se que o tempo de moagem influencia de forma significativa na pozolanicidade do material, e que existe um tempo de moagem ótimo para que a CCA atinja a máxima pozolanicidade.

### 3.4 POZOLANICIDADE DA CCA

A reação pozolânica é a reação da CCA com o hidróxido de cálcio formado pela hidratação do cimento, formando C-S-H (hidróxido de cálcio hidratado). Esta reação é mais lenta que a reação de hidratação do C3S (silicato tricálcico) do cimento Portland. Isto implica em uma taxa de liberação de calor e de desenvolvimento da resistência mais lentos também (TIBONI, 2007).

Reação rápida do C3S do cimento Portland:



Reação lenta da pozolana:



Mehta e Monteiro (2014) salienta ainda que a taxa de reação da CCA com o hidróxido de cálcio é um pouco mais alta que a da sílica ativa, devido talvez, à alta área superficial que a CCA apresenta comparada com a densa textura superficial da sílica ativa, mas ambas são capazes de desenvolver elevadas resistências finais.

Segundo Neville (1997), como pozolana, a sílica da CCA deve estar em estado amorfo, pois a forma cristalina possui pouca reatividade. Além disso, deve estar finamente subdividida para poder se combinar com hidróxido de cálcio na presença da água e formar silicatos estáveis. Ainda segundo o autor, o fenômeno da pozolanicidade é complexo, já que, além da composição química, estão envolvidas a área superficial e a relação entre elas.

Sensale (2006) listou a composição química de várias CCAs estudadas ao longo dos anos, descritas na Tabela 3. O autor observou que as cinzas são predominantemente de natureza silicosa, com teores de sílica entre 87 a 95%.

Tabela 3 - Composição química de várias CCAs (SENSALE, 2006).

Autor	Temperatura de Queima	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
COOK (1976)	450°C	93,15	0,41	0,20	0,41	0,45	ND	0,08	2,31
SALAS (1986)	1000°C	91,26	0,94	0,37	2,15	0,88	ND	ND	ND
CINCOTTO (1989)	500-600°C	94,70	0,09	1,46	0,99	0,95	0,21	0,04	1,75
HWANG E WU (1989)	400°C	88,95	ND	0,74	2,02	1,13	0,83	0,76	6,48
	600°C	88,67	ND	0,46	1,73	0,84	0,81	1,09	6,41
	700°C	92,15	ND	0,00	1,60	0,51	0,79	0,99	3,94
	1000°C	95,48	ND	0,43	1,16	0,59	0,09	0,73	1,28
GUEDERT (1989)	Sem Controle	93,11	0,92	0,40	0,52	0,85	ND	0,12	1,12
SUGITA <i>et al.</i> (1992)	600°C	90,00	0,10	0,40	0,40	0,30	ND	0,06	2,41
SILVEIRA (1996)	560°C	93,00	ND	0,05	0,59	1,90	ND	0,62	3,40
SANTOS (1997)	Sem Controle	90,32	1,36	0,85	1,67	0,50	0,04	0,00	0,70
		95,12	1,42	1,01	1,58	0,37	0,00	0,00	0,44
		93,50	1,90	0,98	1,17	0,63	0,04	0,00	0,66
		95,64	1,40	0,95	1,30	0,43	0,00	0,00	0,47
SENSALE (2006)	De termoelétrica	87,20	0,15	0,16	0,55	0,35	0,32	1,12	3,60
	Queima controlada	88,00	-	0,10	0,80	0,20	-	0,70	2,20

ND: não determinado

Cordeiro *et al.* (2007) revelam que as reações pozolânicas ocorrem desde as primeiras idades até os 90 dias de cura. A Figura 11 apresenta a diminuição do pico correspondente a fixação da portlandita, o que demonstra o potencial pozolânico das CCAs CR (Cinza Residual) e CC (Cinza com controle de temperatura) na pasta de cimento. Os autores observam que com 7 dias, a fixação da portlandita pela CC é muito significativa, o que indica a alta reatividade da adição já nas idades iniciais de cura. Verifica-se a redução do pico até a idade de 90 dias para a CCA CC.

As variações nas características morfológicas e físicas das cinzas de casca de arroz provenientes de diferentes processos de queima são mostradas no diagrama da Figura 12, apresentado por Sensale (2000). O autor demonstra que o amorfismo da CCA está relacionado com o tipo de processo de queima da cinza de casca de arroz, fato comprovado por diversos autores e já demonstrado nesta dissertação.

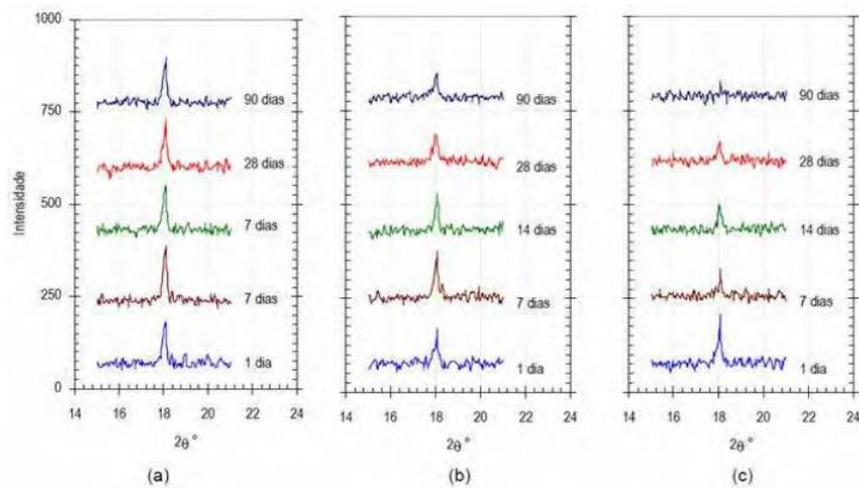


Figura 11 - Fixação da portlandita pela CCA, (a) traço controle (b) traço CR (c) Traço CC (CORDEIRO *et al.* 2007).

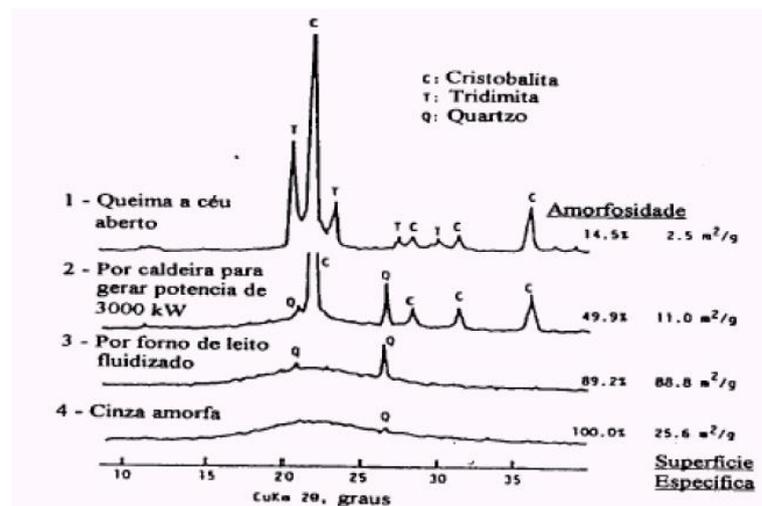


Figura 12 - Características morfológicas e físicas da cinza de casca de arroz provenientes de diferentes processos de queima (SENSALE, 2000).

### 3.5 EFEITOS DA UTILIZAÇÃO DA CCA EM COMPÓSITOS

Alguns pesquisadores notaram a influência dos teores de adição ou substituição do cimento pela CCA e suas consequências nas propriedades de compósitos, concretos e argamassas. Estas propriedades estão relacionadas com a resistência mecânica e a durabilidade.

Tanto o efeito químico da atividade pozolânica como os efeitos físicos, relacionados com o tamanho das partículas, favorecem não só a resistência mecânica como também a permeabilidade, o grau de hidratação, a resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque a sulfatos, entre outros (BARBOSA, 2006).

Costenaro (2003) comparou o efeito de adições minerais como: sílica de casca de arroz (SCA), sílica de ferro-sílico (SFS) cinza de casca de arroz (CCA), para um traço 1:3,5 e relação água-aglomerante de 0,28 como mostrado na Figura 13. Observa-se que a cinza da casca de arroz obteve resultado similar, um pouco inferior, aos das demais sílicas e bastante positivo em relação ao concreto de referência sem nenhuma adição.

Rêgo (2002) realizou um estudo com CCA residual sobre resistência à compressão do concreto, nos teores de 0, 5, 10 e 20% em substituição ao cimento. Os resultados mostraram um aumento dos valores de resistência à compressão para todos os teores em substituição, em comparação ao concreto de referência, chegando a apresentar valores até aproximadamente 20% maiores para o caso de 10% de substituição, aos 63 dias.

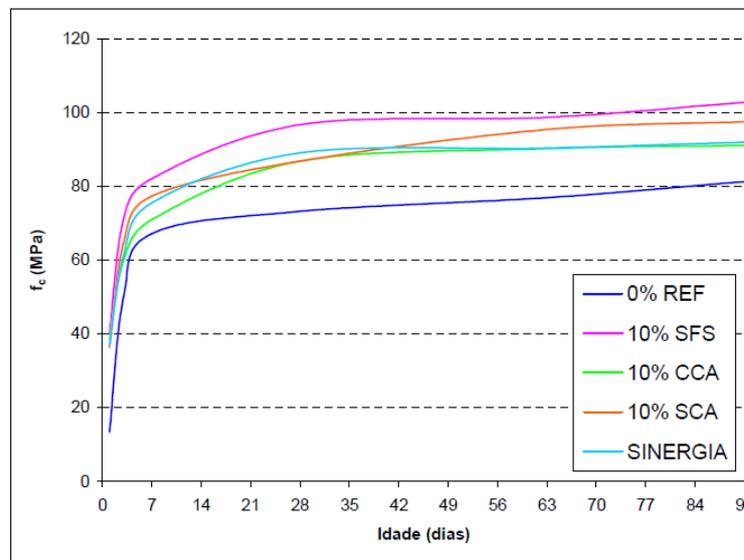


Figura 13 - Diagrama de resistência à compressão x tempo (COSTENARO, 2003).

Um estudo realizado por Sensale e Dal Molin em 2001, teve como objetivo comparar o efeito da adição de CCA no concreto analisando dois tipos de cinza. Uma cinza amorfa proveniente dos Estados Unidos e uma outra cinza residual proveniente do Uruguai, em teores de substituição de 10 e 20%. Os autores chegaram a resultados diferentes para cada tipo de cinza com mesmo teor de substituição. Para cinza americana (amorfa) o melhor desempenho foi com 20% de substituição do cimento, enquanto que para a cinza residual o aumento de 10 para 20% diminuiu os valores de resistência. Porém, os resultados de ambas as dosagens de cinza residual mostraram um bom desempenho quando comparados ao concreto de referência (SENSALE E DAL MOLIN, 2001).

Ribeiro *et al.* (2005) estudou a influência da adição de cinza de casca de arroz, produzida sem controle de temperatura, em substituição à parte do cimento, na confecção de concretos para avaliação da resistência à compressão. As relações água/cimento utilizadas foram de 0,4 e 0,5, com os teores de substituição de cimento por cinza em 5% e 10%. Os resultados encontrados mostraram que a adição de CCA aumentou a resistência à compressão conforme os teores e para um fator alto de água/cimento apresentam valores de resistência à compressão satisfatória.

De acordo com Silva (2007), a utilização de pozolanas extremamente finas e reativas deve ser controlada pelo fato da necessidade de dosagens corretas de aditivos, uma vez que estas pozolanas possuem uma maior dificuldade de se dispersarem. Assim, o uso de um aditivo superplastificante não se faz necessário somente pela necessidade de obtenção de uma boa trabalhabilidade, fixando-se a consistência, e sim pela necessidade de dispersão completa dos grãos das adições utilizadas, proporcionando a sua eficiência. Em seu trabalho, o autor constatou que a aglomeração de CCA amorfa no interior das barras de argamassa com teores de 20% de substituição favoreceu a expansão devido à reação álcali-agregado.

Devido a todas essas vantagens neste estudo é avaliado o uso de cinza de casca de arroz em compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação como será detalhado a seguir.

## 4 COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão sobre a origem dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. Ao longo do capítulo são apresentadas as principais propriedades deste tipo de material, e também é realizada uma revisão sobre a utilização de materiais pozolânicos neste tipo de compósito e seus benefícios ambientais com sua utilização.

### 4.1 ORIGEM DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO

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

Segundo Li (2003) o que diferencia o ECC de outros compósitos cimentícios reforçados com fibras é sua adição máxima de 2% de fibras em relação ao volume total do compósito. Estes compósitos foram projetados para resistir a altas tensões de tração e elevadas cargas de cisalhamento. Garcez (2009) afirma que uma das características mais inerentes a esse material é a alta ductilidade que proporcionam à estrutura.

O ECC possui uma elevada capacidade de absorção de energia e alta capacidade de deformação sob carregamentos de tração, resultando na formação de diversas múltiplas fissuras de pequena espessura durante o processo de ruptura deste compósito. Para se obter esse comportamento a matriz, a fibra e a interação fibra-matriz foram concebidas de acordo com as teorias de micromecânica e da mecânica da fratura (LI, 2003).

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

da capacidade de tensão da fibra, assim proporcionando o efeito chamado de múltipla fissuração.

## 4.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO

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

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

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

O compósito cimentício de elevada capacidade de deformação apresenta uma alta capacidade de deformação pós-pico de carregamento, cujo comportamento foi denominado de *strain-hardening*. Este comportamento proporciona o desenvolvimento de múltiplas fissuras através da transferência de carregamentos entre as fibras existentes. Na transferência de carga a fibra carrega outro ponto criando uma nova fissura, este processo repetitivo resulta na múltipla fissuração e o aumento da ductilidade do compósito, proporcionando que o compósito não rompa bruscamente e obtenha deformações superiores a 3% (LI, 2003). Para um melhor entendimento deste procedimento de múltipla fissuração, a Figura 14 detalha a curva tensão x deformação de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação.

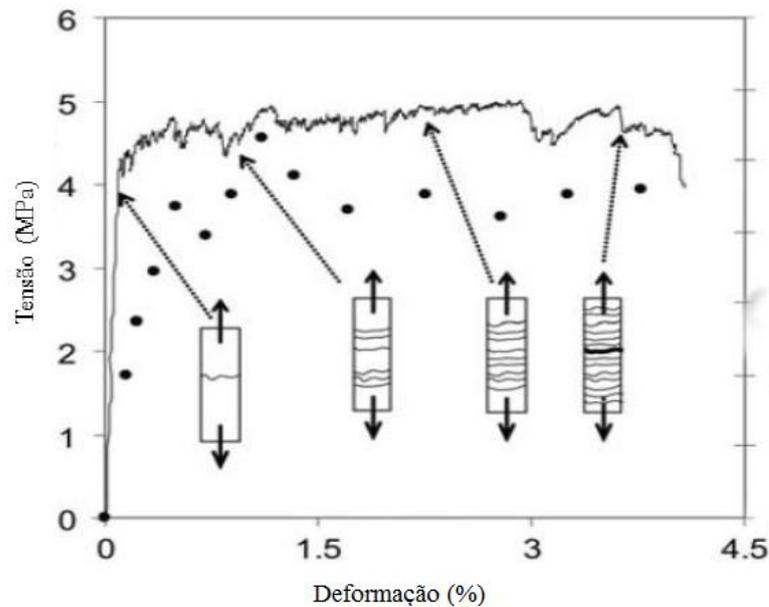


Figura 14 - Curva de tensão x deformação – flexão a quatro pontos (WANG e LI, 2007).

Garcez (2009) salienta que o comportamento de *strain-hardening* é o responsável pela característica mais importante deste compósito, pois o mesmo garante a alta ductilidade, permitindo que o compósito sofra elevadas deformações sem romper, como pode se observar na Figura 15, que demonstra o resultado de um ensaio a flexão.

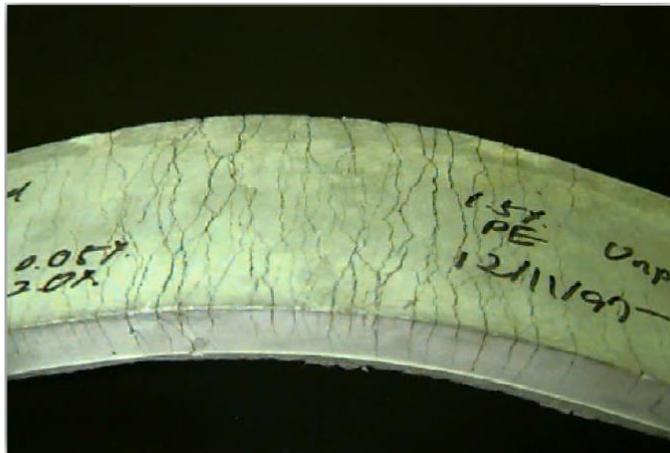


Figura 15 – Aspecto de fissuração de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação (LI e KANDA, 1998).

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

deformação se dá pelo processo de múltipla fissuração, que acaba mantendo as aberturas das fissuras existentes constantes.

Devido à aplicação das fibras de PVA ser inviável no Brasil, uma vez que são produzidas pela empresa Kuraray no Japão, devido ao alto custo de importação e o déficit de quantidade para a aplicação em escala comercial, Garcez (2009) estudou a viabilidade de utilizar fibras de polipropileno, fibra esta que já é comercializada no Brasil e possui um custo mais baixo.

Garcez (2009) estudou vários traços buscando um traço que melhor se adaptasse aos materiais brasileiros. Foram testados dois tipos de cimento: CP V e CP I, também foi analisada a incorporação de cinza volante nas misturas e variação de proporção de areia. A Figura 16 demonstra os resultados de tração direta para o traço com cimento CP V, sem adição de cinza volante e proporção de 0,5 de areia.

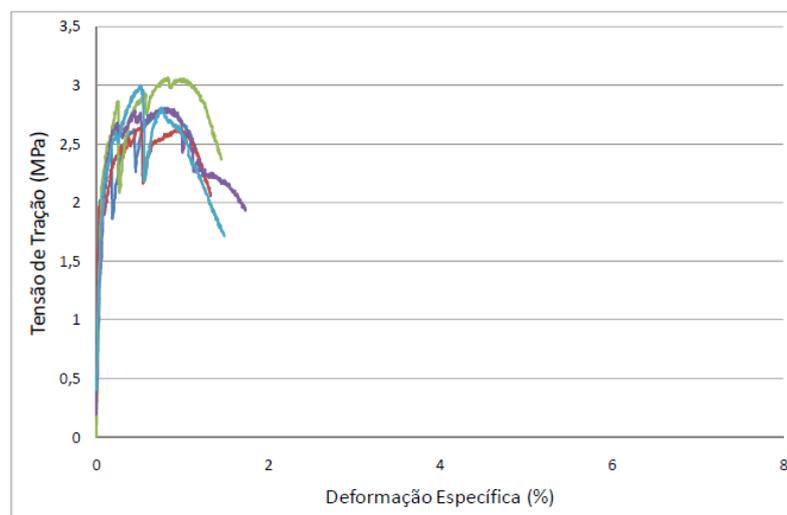


Figura 16 – Curvas de tensão x deformação de corpos de prova ensaiados a tração direta (GARCEZ, 2009).

Garcez (2009) verificou que o compósito apresentou resistência à tração média da ordem de 2,87 MPa, capacidade de deformação média de 1,10% e módulo de elasticidade médio de 20,31 GPa. Os resultados encontrados pela autora demonstram a viabilidade do uso de fibras de polipropileno nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, o que se torna uma vantagem para difundir o uso deste compósito no Brasil.

### 4.3 APLICAÇÕES DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO

Uma das aplicações dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação é como reparo em construção ou reabilitação de pavimentos rígidos e flexíveis. Li (2004) argumenta que em muitos países industrializados, as despesas com reparo de estruturas excede o valor de despesas de novas construções em um período de tempo não muito longo.

Os avanços conseguidos no desenvolvimento de compósitos cimentícios de alto desempenho reforçados com fibras, caracterizados pelo comportamento *strain-hardening*, têm feito destes materiais excelentes opções para utilizações em reparos.

Um exemplo de aplicações do ECC como reparo de pavimentos flexíveis foi desenvolvido na cidade de Ann Arbor, Michigan nos Estados Unidos. Uma pequena faixa do pavimento deteriorado foi reparada com ECC, enquanto o restante da seção foi reparada com concreto comercial especial para reparos comumente utilizado pelas autoridades de transporte daquele estado. As imagens mostram a aparência dos reparos logo após a execução dos mesmos (Figura 17 (a)) e após cinco anos de monitoramento (Figura 17 (b)). Pode se perceber que nenhum dano significativo pode ser observado na faixa de ECC, já na faixa de concreto a exposição dos agregados já era evidente (GARCEZ, 2009).



Figura 17 – Aparência das seções reparadas da ponte após a execução (a) e após cinco anos de exposição ao tráfego e condições ambientais (b) (GARCEZ, 2009).

Os ECCs se tornam uma alternativa viável para recapeamentos de pavimentos devido a sua alta ductilidade e alta tolerância ao dano, podendo substituir recapeamentos de concreto e

mistura de asfalto a quente, resultando em camadas de pequena espessura, duráveis e economicamente viáveis devido a sua baixa manutenção (QUIAN, 2007).

Kamada e Li (2000) investigaram o desempenho à flexão de recapeamento de concreto simples, concretos reforçados com fibras de aço (SFRC) e compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação (ECC). A Figura 18 apresenta curvas de tensão-deformação dos sistemas estudados. Quando o ECC é utilizado como material de recapeamento sobre substrato de concreto, sua capacidade de carga bem como a de deformação do sistema sob flexão podem ser sensivelmente incrementadas quando comparados aos demais sistemas. O incremento na ductilidade e o conseqüente aumento na capacidade de absorção de energia podem resultar no aumento da durabilidade dos sistemas de recapeamentos, este efeito é o resultado das propriedades que os ECCs apresentam quando submetidos à esforços de tração.

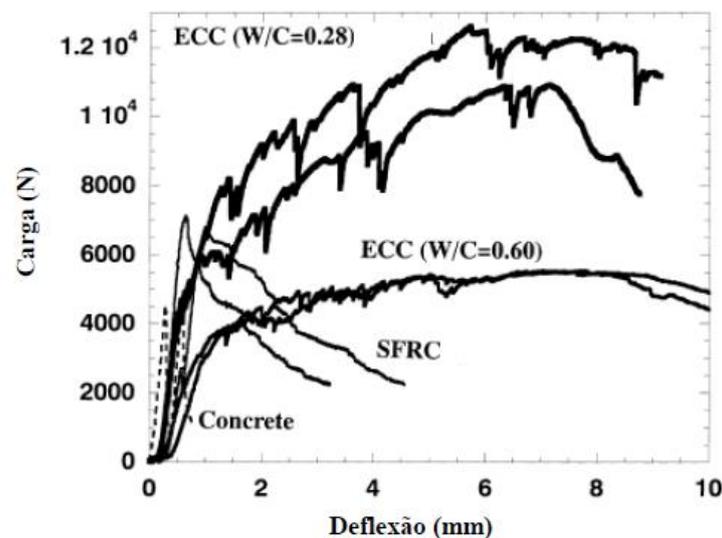


Figura 18 – Curvas tensão-deformação dos sistemas de recapeamentos estudados por Kamada e Li (2000).

Quian (2007) estudou em sua tese a influência da ductilidade na resistência à fissuração refletiva de recapeamentos produzidos com ECC em um substrato de concreto. A altura de ECC estudada foi de 2,5cm e uma base de concreto com dimensão de 5cm de altura, com a presença de uma fissura pré-existente e para efeito de comparação foi realizado o recapeamento de um concreto convencional nas mesmas dimensões do recapeamento de ECC. A Figura 19 ilustra a montagem do ensaio.

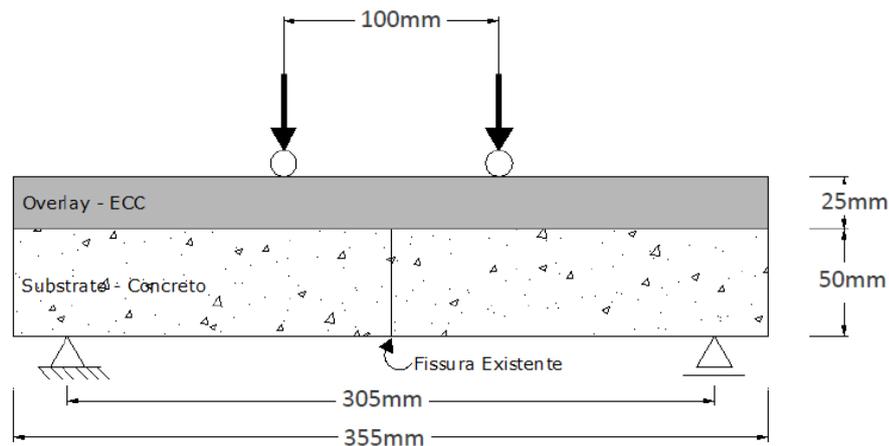


Figura 19 - Montagem do ensaio de reflexão de fissuras (GARCEZ, 2009).

Os resultados encontrados pela autor são apresentados na Figura 20. Examinando a curva tensão de flexão-deformação fica evidente que existem diferenças significativas na resposta do concreto convencional da do ECC. As vigas recapeadas com ECC apresentam maior capacidade de carga sob tensões de flexão que as recapeadas com concreto, consequência da maior resistência à tração do compósito, associada com uma maior capacidade de deformação à tração.

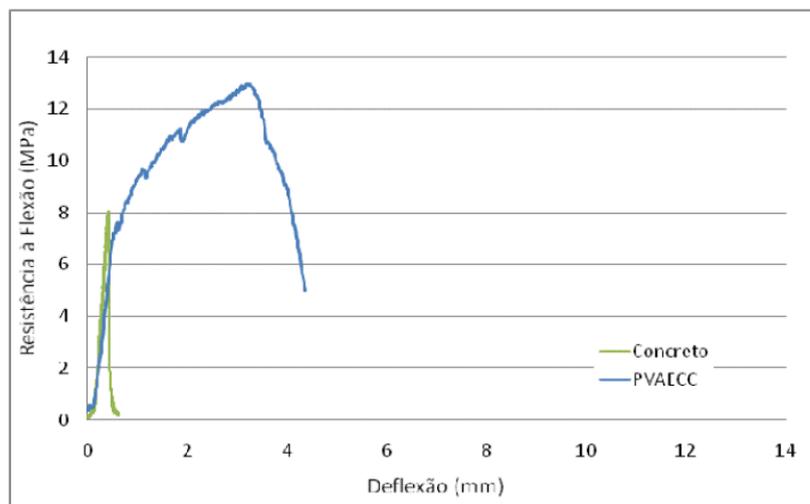


Figura 20 - Curva tensão de flexão - deflexão no meio do vão de vigas compostas por um substrato de concreto fissurado e recapeamento de concreto convencional e ECC (QUIAN, 2007).

Segundo Li (2003) os ECCs também têm excelente capacidade de resistir a esforços de cisalhamento. Sob esse tipo de carregamento, o compósito desenvolve a múltipla fissuração, com o desenvolvimento de fissuras alinhadas na direção normal à direção das tensões

principais de tração. O ECC possui um comportamento à tração dúctil e como consequência a resposta ao cisalhamento também é dúctil. Assim elementos de ECC podem usar uma menor quantidade ou até mesmo dispensar o uso de armadura de cisalhamento. A Figura 21 ilustra um exemplo de ECC em aplicações em construções civis. Analisando as figuras 21 (a) e (b) verifica-se que, apesar da total eliminação dos estribos, a tolerância ao dano da estrutura confeccionada com o ECC armado (Figura 21 (b)), é muito superior à registrada na estrutura confeccionada com concreto armado (Figura 21(a)), tendo a primeira claramente maior capacidade de conter o lascamento e desintegração do elemento.

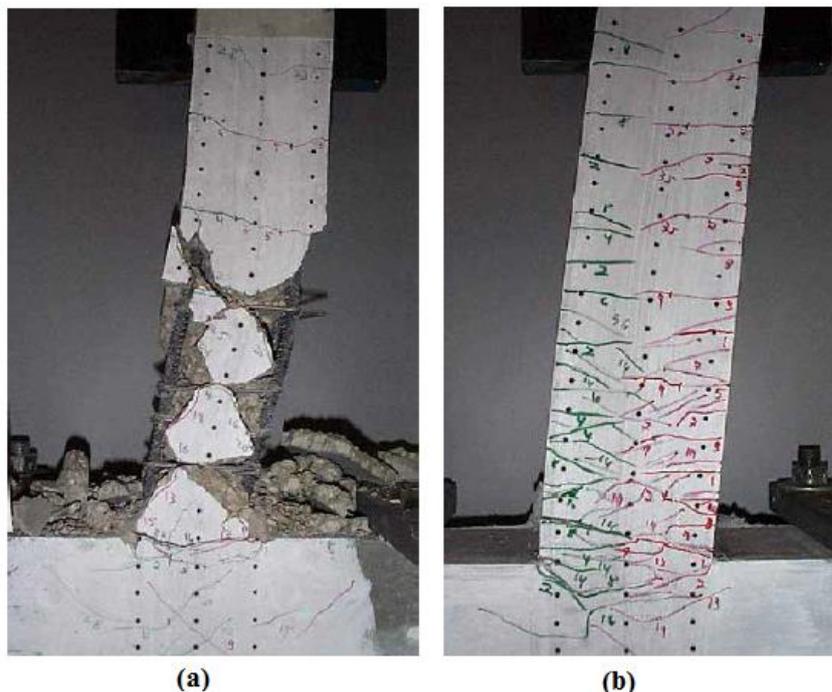


Figura 21 – Situação de pilares ensaiados – (a) concreto convencional (b) ECC (LI, 2003).

#### 4.4 ADIÇÕES POZOLÂNICAS NOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS DE ELEVADA CAPACIDADE DE DEFORMAÇÃO

Os primeiros trabalhos utilizando adições pozolânicas neste tipo de compósito foram realizados pelo Professor Li juntamente com sua equipe. A cinza volante foi o primeiro material pozolânico incorporado à mistura. Conforme apresentado no trabalho de Wang e Li (2007), a adição da cinza volante tornou-se fundamental para que seja possível atingir o comportamento de *strain-hardening*, por ajudar no controle da tenacidade da matriz melhorando em cerca de 2-3% este comportamento em longo prazo. Além disso, o uso da cinza volante mostrou uma melhoria no comportamento de múltipla fissuração, reduzindo o impacto ambiental através da utilização de resíduos industriais na substituição do cimento.

A substituição parcial de cimento por cinza volante nos ECCs se torna uma alternativa economicamente interessante, pois é necessário utilizar uma elevada concentração de cimento no compósito, chegando a se utilizar duas a três vezes mais do que um concreto convencional (WANG e LI, 2007). Segundo Garcez (2009), a incorporação de cinza volante resulta numa redução de custo e pode colaborar na minoração das emissões de CO<sub>2</sub> globais resultantes da produção de compósitos cimentícios, especialmente associadas à produção de cimento, trazendo assim benefícios ambientais. A Figura 22 ilustra os resultados de tensão-deformação encontrados por Garcez (2009) utilizando relação 1:2 (cimento: cinza volante). Este ECC apresentou deformações médias em torno de 3% e tensões médias de 2 MPa.

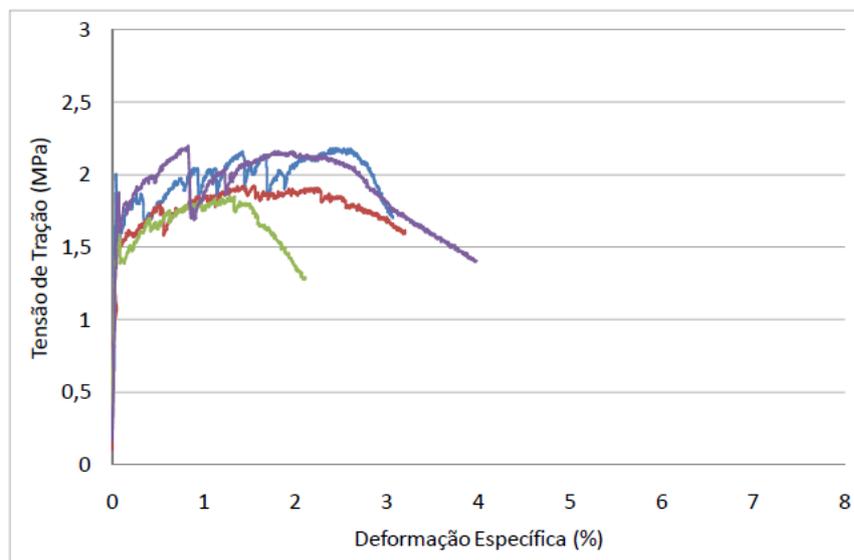


Figura 22 - Curvas de tensão x deformação de corpos de prova com o uso de cinza volante - ensaiados a tração direta (GARCEZ, 2009).

Zhu *et al.* (2012) estudaram a combinação da cinza volante com a escória de alto-forno em proporções de no máximo 70% nas idades de 28 e 90 dias. As proporções estudadas foram com 70% de cinza volante; 60% de cinza volante e 10% escória de alto-forno; 50% de cinza volante e 20% de escória de alto-forno e 40% de cinza volante e 30% de escória de alto-forno. Os resultados encontrados pelos autores são demonstrados na Figura 23.

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

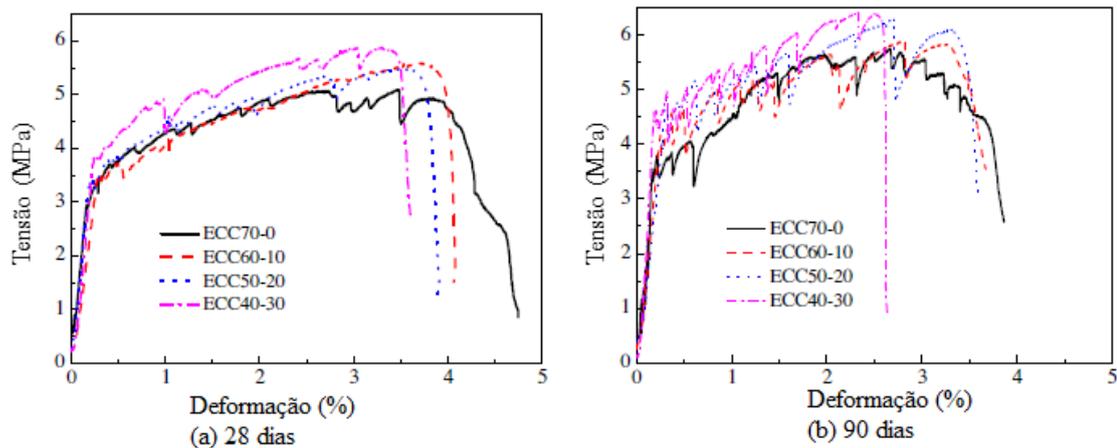


Figura 23 – Tensão x deformação de ECCs com combinações de cinza volante e escória de alto-forno em diferentes idades (ZHU *et al.* 2012).

Na mesma tendência de se obter um compósito mais sustentável o Professor Victor Li e sua equipe em 2013 estudaram a substituição do agregado miúdo por rejeitos de minério de ferro nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no trabalho de Huang *et al.* (2013). Os resíduos estudados foram sílica, alumina e óxido de ferro com quartzo como fase mineral principal. Este tipo resíduo é originado através do processo de beneficiamento do minério de ferro e em muitos países é considerado como lixo e muitas vezes não são utilizados. Os mesmo pesquisadores já desenvolveram várias alternativas com o intuito de transformar o compósito cimentício de elevada capacidade de deformação no mais sustentável possível, colaborando para a diminuição da utilização de recursos naturais, consumo de energia e principalmente diminuir o custo deste compósito.

O trabalho de Huang *et al.* (2013) teve como objetivo investigar a viabilidade destes rejeitos de minério como agregados na produção de compósitos e analisar a influência do tamanho do resíduo nas propriedades mecânicas do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação. Quatro tamanhos de rejeitos foram estudados, IOTs-Fina que não passou por nenhum processo de peneiramento, IOTs-425, IOTs-600 e IOTs-1180, que passaram pelo processo de peneiramento nas malhas #425, #600, #1180, respectivamente. A Figura 24 demonstra os resultados obtidos com esses quatro rejeitos no ensaio de tração direta.

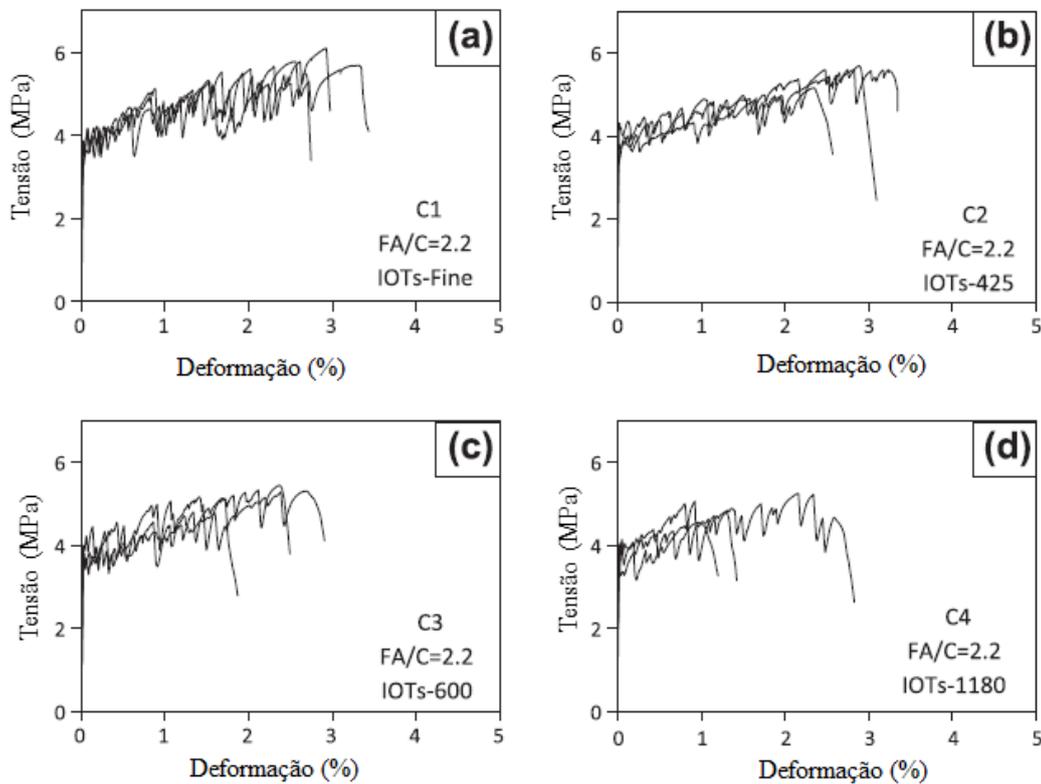


Figura 24 - Curvas tensão x deformação de tração uniaxial para misturas com IOTs aos 28 dias (a) IOTs-fina (b) IOTs-400 (c) IOTs-600 (d) IOTs-1180 (HUANG et al., 2013).

Os resultados do estudo de Huang *et al.* (2013) demonstram a viabilidade da utilização de resíduos de minérios de ferro como agregados na produção de compósitos. O tamanho da partícula desses rejeitos tem influência significativa nas propriedades mecânicas dos compósitos. Através da Figura 24 (a) e (b) pode-se perceber que foram os melhores traços com a utilização desse rejeito demonstrando uma elevada ductilidade à tração. Já para os dois traços com maior granulometria (Figura 24 (c) e (d)) houve uma perda significativa no desempenho dos compósitos quando submetidos à tração. Para os autores este estudo potencializa o uso desses rejeitos de minérios de ferro nos compósitos cimentícios na produção de compósitos mais sustentáveis.

Seguindo na mesma tendência de combinações binárias de pozolanas, os autores Zhu *et al.* (2014) investigaram a possibilidade de combinações de pozolanas em matrizes binárias e ternárias, utilizando cinza volante, sílica ativa e escória de alto forno nas substituições de 50%, 60%, 70% e 80%. As combinações de pozolanas escolhidas foram (cinza volante + cimento; escória de alto forno + cimento; cinza volante + escória + cimento; cimento + cinza volante + sílica ativa). Na Figura 25 é possível visualizar as curvas força x deflexão dos compósitos gerados com as combinações de adições pozolânicas.

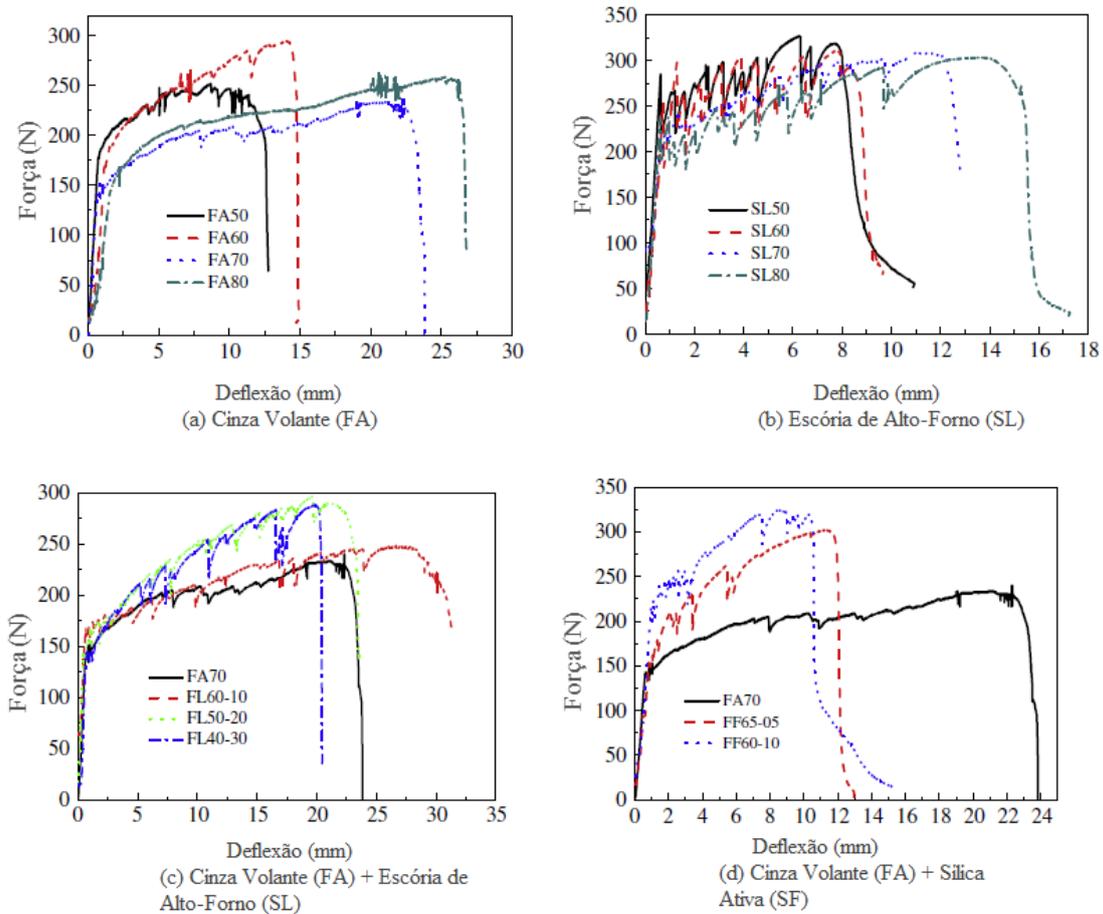


Figura 25 – Curvas de força x deflexão de misturas com adições pozolânicas aos 28 dias – (a) cinza volante (b) escória de alto forno (c) combinação de cinza volante com escória (d) combinação de cinza volante com sílica ativa (ZHU et al. 2014).

Zhu *et al.* (2014) chegaram a conclusão que para as duas combinações binárias, a medida que se aumentou o teor de substituição, a capacidade de deflexão aumentou. Este mesmo comportamento é percebido tanto para a cinza volante quanto para a escória de alto forno. É notado que a combinação binária de escória de alto forno apresentou uma múltipla fissuração mais acentuada do que a de cinza volante. Os autores explicam que esse comportamento se deve ao formato das partículas, pois a cinza volante possui partículas esféricas, o que facilita o deslizamento das fibras quando tracionadas, já as partículas de escória de alto forno tem formato angular, o que facilita o ancoramento das fibras.

Nas Figura 25 (c) e (d) a mistura FA 70 foi considerada como amostra de referência. Para as combinações ternárias, pode-se perceber que tanto as combinações de cinza volante e escória de alto forno, como cinza volante e sílica ativa, obtiveram bons resultados, notando que a combinação cinza volante + sílica ativa demonstraram deflexões menores quando comparado à outra combinação. Para os mesmos autores as combinações de materiais pozolânicos

melhoram a rigidez da matriz assim contribuindo para o aumento de resistência para a abertura da primeira fissura.

Outro fator que favorece o uso de pozolanas na matriz dos compósitos cimentícios é a diminuição do calor de hidratação do cimento. Como já foi citado anteriormente, este compósito possui um consumo de cimento de duas a três vezes maior que concretos convencionais. Para Metha e Monteiro (2014), os compostos do cimento Portland são produtos de reações de alta temperatura que não estão em equilíbrio e, por isso, estão em um estado de energia elevada. Quando um cimento é hidratado, os compostos reagem com a água para atingir estados estáveis de baixa energia e o processo é acompanhado pela liberação de calor. Em suma, as reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas. A quantidade total de calor liberado e as taxas de liberação de calor pela hidratação dos compostos individuais podem ser usadas para caracterizar o comportamento de pega e endurecimento do cimento.

Estudos realizados por Vargas (2002), referentes ao comportamento de hidratação do cimento, em substituições parciais de cimento por pó de aciaria elétrica, demonstraram o efeito retardador nas pastas de cimentos proporcionado por esta substituição (Figura 26). Este trabalho destaca ainda que a forma da curva da pasta de referência apresenta uma base mais estreita e de maior altura em relação às outras, demonstrando nesse caso, uma maior liberação de calor em menor espaço de tempo.

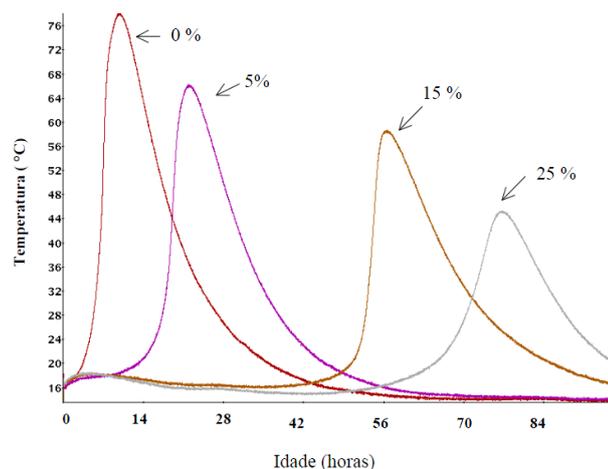


Figura 26 - Calor de hidratação da pasta de cimento de referência (0%) em relação às pastas com adição de 5%; 15% e 25% de aciaria elétrica ao longo do tempo (horas) (VARGAS, 2002).

Após muitos autores terem confirmado que o uso de pozolanas artificiais nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação é viável tanto do ponto de vista mecânico quanto ambiental, este estudo visa estudar o uso da cinza de casca de arroz em substituição parcial ao cimento, visto que este tipo de pozolana ainda não foi estudado e também por se tratar de um resíduo com grandes produções no estado do Rio Grande do Sul.

## 5 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo descreve as bases do programa experimental para que seja atingido o objetivo principal do trabalho: o desenvolvimento e caracterização de um compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz e com o uso de fibras de polipropileno.

O método é dividido em 4 fases. A primeira fase consiste na caracterização dos materiais a serem utilizados. A fase dois é destinada ao processo de dosagem, moldagem e cura dos compósitos. A terceira fase se constitui na caracterização mecânica (através de ensaios de flexão a quatro pontos e tração direta) de diferentes versões do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com cinza de casca de arroz e fibras de polipropileno, visando à obtenção de compósitos com comportamento de *strain-hardening* e múltipla fissuração sob carregamentos de tração e flexão.

Na fase quatro são realizados ensaios complementares para uma melhor caracterização do compósito. A partir dos resultados da terceira fase, são selecionados os traços com melhor desempenho mecânico para realização de ensaios de aderência por arrancamento e cisalhamento e reflexão de fissuras, simulando o uso do material como reparo para pavimentos, sendo esta uma provável possibilidade de utilização do compósito. Além disso, são realizados ensaios de curva de liberação de calor de hidratação e absorção e índice de vazios visando um indicativo da durabilidade do material. Por fim, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura para análise da interface entre a fibra e a matriz dos compósitos cimentícios. Para facilitar a visualização de como o programa experimental foi realizado a Figura 27 mostra esquematicamente todas as fases do programa. As subdivisões apresentadas ao longo das fases corresponde ao número adotado para as seções deste capítulo.

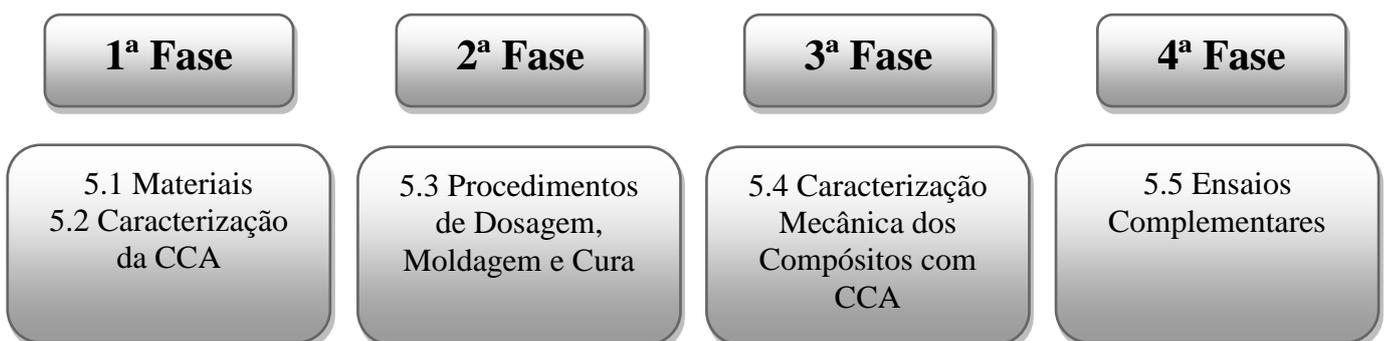


Figura 27 – Esquema do programa experimental.

## 5.1 MATERIAIS

Neste item são apresentadas as características básicas dos materiais empregados no programa experimental desta pesquisa. Todos os materiais utilizados neste estudo são produtos comercializados no Brasil, com exceção da cinza de casca de arroz que é um resíduo agroindustrial que ainda não está disponível comercialmente.

### 5.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado para a produção dos compósitos é o CP V-ARI de alta resistência inicial produzido pela Empresa Nacional. Suas características físicas, químicas e mecânicas, de acordo com informações fornecidas pelo fabricante, estão apresentadas na Tabela 4. Utilizou-se o cimento CP V-ARI pelo fato de ser o cimento com menos adições disponível no mercado.

Tabela 4 - Composição do cimento CP V (Fonte: Brennand Cimentos, 2014).

<b>Ensaio Químicos</b>			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel - RI	%	0,7	≤ 1,0 - NM 15/12
Perda ao Fogo - PF	%	3,57	≤ 4,5 - NM 18/12
Óxido de Magnésio - MgO	%	1,36	≤ 6,5 - NM 21/12
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	%	2,65	≤ 4,5 - NM 16/12
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	%	2,55	≤ 3,0 - NM 20/12
<b>Ensaio Físicos</b>			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	4.575	≥ 3.000 - NM 76/98
Massa Específica	g/cm <sup>3</sup>	3,09	não aplicável - NM 23/01
Índice de Finura - #75 µm (nº200)	%	0,02	≤ 6,0 - NBR 11579/13
Resíduo na Peneira #325	%	0,4	não aplicável - NBR 9202/85
Água de consistência normal	%	31,4	não aplicável - NM 43/03
Início de Pega	minutos	139	≥ 60 - NM 63/03
Fim de Pega	minutos	198	≤ 600 - NM 65/03
Expansibilidade à quente	mm	0,00	≤ 5,0 - NBR 11582/12
<b>Ensaio Mecânicos - NBR 7215/96</b>			
Ensaio	UN.	Resultado	Exigências
Resistência à Compressão - 1 dia	MPa	29,8	14
Resistência à Compressão - 3 dias	MPa	42,5	24
Resistência à Compressão - 7 dias	MPa	48,2	34
Resistência à Compressão - 28 dias	MPa	57,2	não aplicável

### 5.1.2 Água de Amassamento

A água utilizada para a mistura dos compósitos é a proveniente da rede pública de distribuição de água da cidade de Porto Alegre.

### 5.1.3 Agregado Miúdo

#### 5.1.3.1 Areia Fina

Para a composição do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação foi utilizada uma areia fina de origem natural, tipo quartzosa do município de Porto Alegre. Este trabalho também inicia os estudos da utilização de uma areia fina de origem natural na matriz cimentícia destes compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. Estudos anteriores ainda utilizavam uma areia normatizada o que encarece ainda mais o uso destes compósitos. A caracterização deste agregado foi realizada segundo o procedimento recomendado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica (Tabela 5).

Para o ensaio da massa específica utilizou-se a recomendação da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009): Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. A Tabela 5 detalha a composição do agregado miúdo. Esta areia também foi utilizada para a confecção de bases de concreto necessárias para a realização dos ensaios nos itens 5.5.3, 5.5.4, 5.5.5, respectivamente, estes ensaios serão detalhados ao longo do método.

Tabela 5 - Composição granulométrica da areia fina e massa específica.

<b>Caracterização do Agregado Miúdo</b>		
Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0,00	0,00
6,3	0,30	0,30
4,75	0,10	0,40
2,36	0,30	0,70
1,18	0,40	1,10
0,6	0,40	1,40
0,3	3,30	4,70
0,15	53,90	58,60
Fundo	37,60	100,00

Módulo de finura: 0,67  
 Massa Específica do Agregado Miúdo (g/cm<sup>3</sup>): 2,52  
 Dimensão máxima característica (mm): 0,3

### 5.1.3.2 Areia Média

A areia média utilizada nas confecções das bases de concreto (cabe lembrar que essas bases de concreto serão detalhadas ao longo do método nos itens 5.5.3, 5.5.4 e 5.5.5), é uma areia média de origem natural e sua composição encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização granulométrica da areia média e massa específica (agregado miúdo).

<b>Caracterização da Areia (agregado miúdo)</b>		
Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
9,5	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00
4,75	0,00	0,00
2,36	3,30	3,30
1,18	8,60	11,90
0,6	7,40	19,30
0,3	46,40	65,70
0,15	32,00	97,70
Fundo	2,29	100,00
Módulo de finura: 1,98		
Massa Específica do Agregado Miúdo (g/cm <sup>3</sup> ): 2,4		
Dimensão máxima característica (mm): 2,36		

### 5.1.4 Agregado Graúdo

A brita utilizada no traço para as confecções das bases de concreto é de origem basáltica e sua composição se encontra na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização granulométrica da brita e massa específica.

<b>Caracterização da Brita (agregado graúdo)</b>		
Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
25	0,00	0,00
19	1,30	1,30
12,5	56,30	57,60
9,5	37,70	95,40
6,3	0,00	95,40
4,75	4,60	100,00
Fundo		
Módulo de finura: 7,03		
Massa Específica do Agregado Graúdo (g/cm <sup>3</sup> ): 2,9		
Dimensão máxima característica (mm): 25		

### 5.1.5 Aditivo Superplastificante

No estudo, foi usado o aditivo superplastificante Glenium 54 fornecido pela empresa BASF com base de éter policarboxílico. Este tipo de aditivo possui alta eficiência na redução de teor de água, comparado com os mais comumente utilizados.

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

A cinza de casca de arroz da queima sem controle de temperatura utilizada neste trabalho é utilizada como combustível no processo de parbolização dos grãos de arroz. Esta queima se processa de maneira instantânea em fornalhas com grelhas, resultando como rejeito deste processo uma cinza de cor predominantemente preta ou cinza escuro (Figura 28). Para o presente trabalho, foram coletados cerca de 200 kg de cinza gerada no mês de outubro de 2013. A empresa que doou esta cinza não dispunha de informações precisas a respeito das condições de queima adotadas na geração da cinza.



Figura 28 – Cinza de casca de arroz obtida do processo de queima sem controle de temperatura.

A cinza teve sua granulometria reduzida por meio de um moinho de bolas com dimensões de 310 mm de altura e diâmetro de 275 mm contendo 75 bolas de 38 mm de diâmetro (Figura 29). Foi moído 1 quilo de CCA por vez nos tempos de 1, 2, 4, 6 e 8 horas, realizando-se, desse modo, a moagem com o intuito de aumentar a finura da cinza.

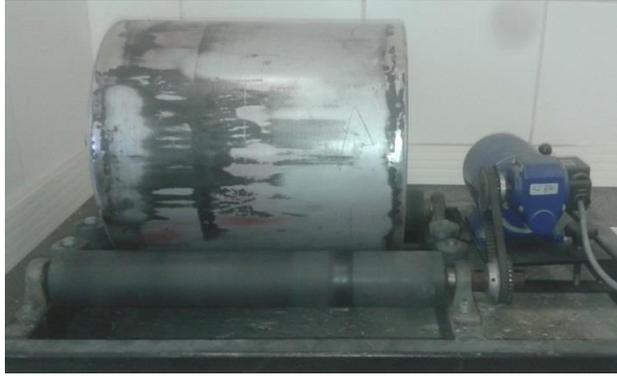


Figura 29 - Moinho de bolas utilizado para a moagem da CCA.

### 5.1.7 Fibras de Polipropileno

Com um custo mais baixo comparativamente às fibras de PVA originalmente utilizadas, as fibras de polipropileno possuem características específicas (conforme mostrado na Tabela 8) destacando-se perante as outras. O polipropileno caracteriza-se por ser um plástico inodoro, incolor e atóxico tendo uma densidade aproximada de  $900 \text{ kg/cm}^3$  (CASAGRANDE, 2012). Neste estudo foi utilizada a porcentagem de 2% de fibras de polipropileno do volume total do compósito. Esta porcentagem de fibras já foi avaliada em estudos anteriores (Li (2003) e Garcez (2009)). A Figura 30 apresenta uma imagem da fibra de polipropileno utilizada na pesquisa.



Figura 30 – Fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa.

Tabela 8 – Características da fibra (GARCEZ, 2009).

<b>Propriedades da Fibra de Polipropileno</b>	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	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

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DA CCA

Neste item é apresentada uma descrição dos ensaios de caracterização química e física realizados na cinza de casca de arroz, determinando se a CCA atende aos requisitos mínimos exigidos da Norma de Materiais Pozolânicos NBR 12653 (ABNT, 2014) e se enquadra como um material com pozolanicidade.

### 5.2.1 Difração de Raios-X (DRX)

No âmbito de caracterização mineralógica, a difratometria de raios X corresponde a uma das principais técnicas de análise. As análises da CCA dessa pesquisa foram efetuadas no Laboratório de Materiais Mecânicos (LACER/UFRGS). As amostras foram peneiradas na malha #325, depois foram acondicionadas em embalagens plásticas até a realização do ensaio. O difratômetro utilizado é o da marca Siemens, modelo D5000, com intervalo de medida na faixa de 5° a 75° de 2θ e passo a cada 1 segundo de 0,05°.

### 5.2.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

Através desse ensaio é possível estabelecer quantitativamente o teor de elementos químicos presentes na CCA. As amostras foram separadas e catalogadas em embalagens plásticas e as análises também foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS). Para este ensaio foi utilizado um espectrômetro da marca RIGAKU, modelo RIX2000, utilizando tubo de raios-X com alvo de ródio, aceleração máxima de 60kV.

### 5.2.3 Perda ao Fogo

Com este ensaio é possível determinar a presença de impurezas na amostra, tais como argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica. A perda ao fogo é determinada por variação

gravimétrica pela queima a 1000°C em forno mufla por 2 horas. Para a realização deste ensaio são utilizadas as recomendações da Norma NBR NM 18 (ABNT, 2012): Cimento Portland – Análise Química – Determinação de perda ao fogo.

#### 5.2.4 Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle

Com este ensaio é possível ter uma medida direta do grau de pozolanicidade do material por meio da determinação da resistência à compressão simples. Neste ensaio são moldadas argamassas de referência contendo apenas cimento Portland, enquanto as demais apresentam 35% de substituição do volume de cimento por cinza de casca de arroz. O índice de atividade pozolânica com o cimento é dado pela razão entre a resistência à compressão média da argamassa de referência pela resistência à compressão média da argamassa com CCA. O índice de desempenho da cinza de casca de arroz é realizado de acordo os procedimentos estabelecidos na NBR 5752 (ABNT, 2014): Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Para esse ensaio é utilizado o cimento CP II –F-32 com o traço de 1:3.

#### 5.2.5 Massa específica

A determinação da Massa específica da Cinza de Casca de Arroz é realizada seguindo as recomendações da NBR 23 (ABNT, 2000): Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da massa específica. Esta Norma estabelece os procedimentos para determinação da massa específica de cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier.

#### 3.2.6 Distribuição Granulométrica

A técnica empregada para determinar as distribuições granulométricas das amostras foi realizada por difração a laser. As amostras são preparadas na forma de suspensão, ou seja, cinza de casca de arroz e água, e em seguida são submetidas à agitação para completa desaglomeração das partículas. Na sequência, as amostras são colocadas em um equipamento chamado de granulômetro, marca Cilas, modelo 1064, para a realização das leituras. Este ensaio também foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS).

### 5.3 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM, MOLDAGEM E CURA

Para o programa experimental foi empregado um único traço para todas as misturas de ECC, conforme descrito na Tabela 9.

Tabela 9 – Dosagem do traço referência.

<b>Traço Referência</b>			
Componentes	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Proporção	Peso (g)
Cimento	3,11	1	1917
Areia Fina	2,52	0,75	1439
Água	1	0,34	662,1
Aditivo	1,09	0,006	13,4
CCA	-	-	-
Fibra PP	0,9	0,018	34

Este estudo visou substituir cimento por cinza de casca de arroz nas porcentagens de 10%, 20% e 30% em volume. A quantidade de cinza para as várias frações de substituição foram calculadas com base nos ensaios de massa específica das amostras de cinza. A mistura dos materiais do compósito de elevada capacidade de deformação foi realizada em um misturador mecânico planetário especial para argamassas com capacidade de 2 litros. Os materiais secos (cimento, areia e CCA) foram colocados no misturador até se obter uma mistura de pós uniforme. Posteriormente, se procedeu à adição da água de amassamento e do aditivo superplastificante.

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

O processo de mistura e moldagem pode ser observado na sequência da Figura 31. Em (a) se observa a mistura dos materiais secos, em (b) o aspecto da mistura após a adição de água e aditivo, em (c) o aspecto da mistura após a adição das fibras e em (d) o processo de moldagem dos corpos de prova. A cura dos corpos de prova foi realizada em uma câmara úmida à temperatura de (23±2)°C e umidade relativa do ar superior a 95%, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003): Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.

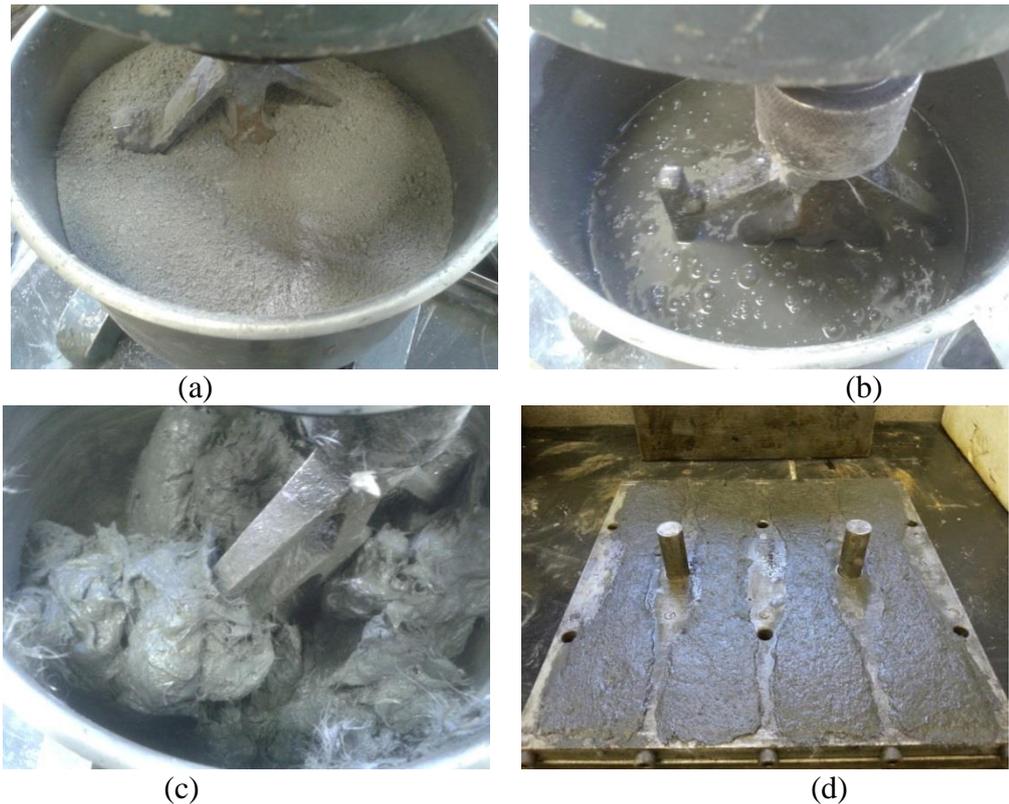


Figura 31 – Processo de moldagem dos compostos (a) materiais secos; (b) mistura após a adição de água e aditivo; (c) mistura com fibra de polipropileno; (d) moldagem.

## 5.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM CCA

Neste item são abordados os ensaios mecânicos para a caracterização dos compostos de elevada capacidade de deformação com CCA. Os traços que apresentarem resultados mais satisfatórios serão utilizados para a realização da fase 4 do programa experimental.

### 5.4.1 Tração Direta

Bastos (1999) comenta que, segundo o ACI 544.4R (1988), não existe qualquer ensaio de resistência à tração direta padronizado para determinar a curva tensão de tração-deformação de compostos com fibras, e esta depende diretamente das dimensões do corpo de prova, do método de ensaio empregado e da rigidez do equipamento. Segundo o autor, os resultados dos ensaios de tração direta apresentam normalmente uma grande variabilidade entre os resultados. Para avaliar a tração direta, este trabalho seguirá o procedimento proposto por Boshoff e Zijl (2006). Neste método, a velocidade de carregamento aplicada é igual a 5 N/s, e as dimensões dos corpos de prova são apresentadas na Figura 32, que também mostra um corpo de prova durante a execução do ensaio. Para a confecção desses corpos de prova foi projetada uma fôrma de aço de maneira a garantir uma maior uniformidade das peças e a

contribuir para a redução da variabilidade normalmente encontrada neste tipo de ensaio. A Tabela 10 demonstra a estratégia experimental realizada para este ensaio.

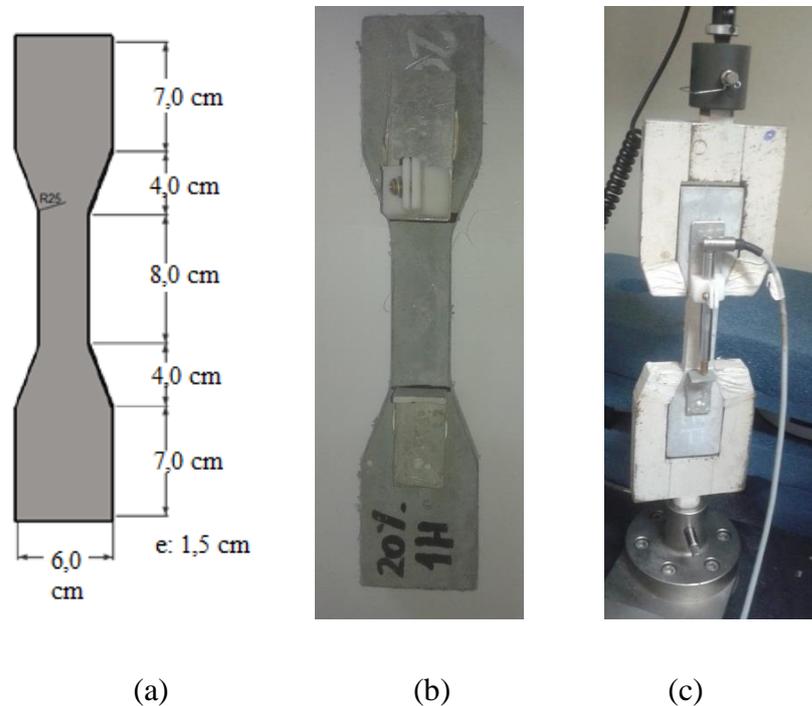


Figura 32 – (a) Dimensões do corpo de prova; (b) corpo de prova moldado; (c) corpo de prova durante ensaio de tração direta.

Tabela 10 – Estratégia experimental – tração direta.

<b>Tração Direta</b>	
Dimensões do corpo de prova	detalhadas na Figura 33
Idade de ruptura	28 dias
Amostras ensaiadas	4 por tipo compósito
Teor de substituição (%)	10%, 20% e 30%
Tempo de moagem da CCA	1h, 2h, 4h, 6h, 8h

#### 5.4.2 Flexão a Quatro Pontos

O ensaio de flexão que foi utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido por Perrone em 2012<sup>2</sup>, e usado em seu trabalho de pesquisa, atualmente ainda não publicado. Baseado em Magalhães (2010), o ensaio tem como base a Norma ASTM C1609 – Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete, realizados em quatro pontos do corpo de prova. Os corpos de prova tem dimensões de 300 mm x 70 mm x 15 mm onde a carga aplicada

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

concentra-se igualmente dividida entre os dois terços do vão, a uma distância de 77 mm dos apoios e o vão possui 231 mm de distância entre os apoios. A Figura 33 detalha a configuração do ensaio. O mesmo possui dois LVDTs para medir deslocamento do corpo de prova, um posicionado na vertical e outro na horizontal. A Tabela 11 demonstra a estratégia experimental realizada para a execução deste ensaio.

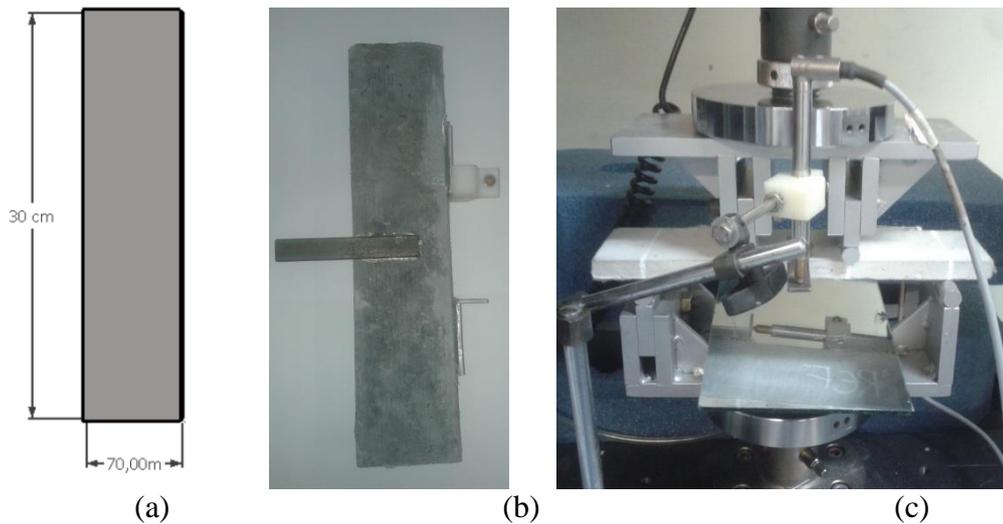


Figura 33 – (a) Dimensões do corpo de prova; (b) corpo de prova moldado; (c) corpo de prova durante o ensaio de flexão.

Tabela 11 – Estratégia experimental – flexão à quatro pontos.

<b>Flexão a Quatro Pontos</b>	
Dimensões do corpo de prova	300 mm x 70 mm x 15 mm
Idade de ruptura	28 dias
Amostras ensaiadas	4 por tipo compósito
Teor de substituição (%)	10%, 20% e 30%
Tempo de moagem da CCA	1h, 2h, 4h, 6h, 8h

## 5.5 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Os ensaios complementares realizados na fase 4 do método foram apenas confeccionados para os traços escolhidos com melhor desempenho mecânico escolhidos da fase 3. Desta maneira, conforme será observado mais adiante nos resultados do trabalho, foram confeccionadas amostras com o compósito referência, compósito com substituição de 30% da CCA moída por 8 horas e compósito com substituição de 30% da CCA moída por 4 horas. A nomenclatura adotada para designação desses três traços está disposta na Tabela 12.

Tabela 12 – Nomenclatura adotada na fase 4 da dissertação.

Nomenclatura	
Denominação	Código
Compósito Referência	ECC-REF
Compósito 30% de CCA 8 horas moída	ECC-CCA-30%8H
Compósito 30% de CCA 4 horas moída	ECC-CCA-30%4H

### 5.5.1 Absorção e Índice de Vazios

Visando obter um indicativo quanto à durabilidade, esta dissertação buscou analisar a absorção e o índice de vazios dos compósitos. O ensaio de absorção e índice de vazios foi realizado de acordo com a NBR: 9778 (ABNT, 2005): Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica. Para a realização desse ensaio foram utilizados três corpos de prova para cada traço com dimensões de 50 x 100 mm, ensaiados aos 28 dias. A Figura 34 mostra uma das etapas de execução do ensaio, em que os corpos de prova encontram-se submersos em água para fervura por um período de 5h. A Tabela 13 detalha a estratégia experimental para a execução do ensaio proposto.



Figura 34- Etapa de execução do ensaio de absorção e índice de vazios – Fervura por 5 horas.

Tabela 13– Estratégia experimental – absorção e índice de vazios.

Absorção e Índice de Vazios	
Dimensões do Corpo de Prova	d: 50 mm e h:100 mm
Idade do Ensaio	28 dias
Amostras Ensaeadas	4 por tipo compósito
Teor de Substituição (%)	30%
Tempo de Moagem da CCA	4h, 8h

### 5.5.2 Curva de Liberação de Calor de Hidratação

O ensaio consiste em medir a temperatura durante o período inicial do processo de hidratação do cimento. Uma curva padrão é normalmente composta por uma elevação brusca de temperatura (ápice das reações), até o momento em que a temperatura se estabiliza, onde as reações de hidratação reduzem consideravelmente. O método de ensaio utilizado foi desenvolvido para fins desta pesquisa, e tem como objetivo apenas uma análise comparativa entre os vários compósitos analisados neste estudo, conforme descrito na sequência.

Após a mistura, as amostras foram acondicionadas dentro de duas fôrmas nas dimensões de 30 x 12 x 5 cm, conectado a termopares tipo K. Neste ensaio foi verificada a influência do volume do compósito com a liberação de calor. Desta maneira, foram realizadas moldagens de 100% e 50% do volume total da fôrma (Figura 35). A fôrma com 100% de seu volume total preenchido teve dois termopares posicionados um no meio da fôrma e a outro a  $\frac{1}{4}$  da fôrma, respectivamente (Figura 36(a)), ambos na metade na espessura do corpo de prova. E na fôrma com 50% de seu volume preenchido foi posicionado um único termopar no centro do corpo de prova (Figura 36(b)), na metade de sua espessura.



Figura 35– Moldagem das amostras.



Figura 36 – Posição dos termopares na amostra para ensaio de curva de liberação de calor, (a) posição dos termopares na fôrma com 100% do volume utilizado; (b) e na fôrma com 50% do volume utilizado.

Posteriormente, as fôrmas foram colocadas em duas caixas de isopor e fechadas com fita adesiva visando a não interferência do ambiente externo (na tentativa de criar um sistema adiabático) conforme a Figura 37. Neste ensaio é utilizado um Módulo de Aquisição e Registro - FieldLogger conectado a termopares e registrada a curva no software do fieldLogger. A avaliação da curva de liberação de calor de hidratação durou 7 dias corridos de leitura, buscando analisar se compósitos com CCA liberam calor mais gradativamente.

É importante salientar que o método utilizado não obedece a procedimentos padrão ou normas específicas, e foi concebido exclusivamente para a realização desta pesquisa, com a finalidade de comparar os compósitos analisados.



Figura 37– Ensaio de liberação de calor de hidratação.

### 5.5.3 Aderência Pelo Método de Arrancamento (*pull-off test method*)

Com a finalidade de estudar as características de aderência na interface do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação e concreto, um dos métodos abordados neste estudo é o método de arrancamento (*pull-off test method*). Este ensaio foi realizado baseado na possibilidade de se utilizar o compósito para reabilitação de pavimentos de concreto.

Para a realização deste ensaio foi necessário moldar placas de concreto (substrato) nas dimensões de 250 x 500 x 50 mm. Neste estudo foi utilizado um traço comum para aplicação em pavimentos, conforme Tabela 14.

Tabela 14- Traço de Concreto para Pavimentos.

Traço utilizado nas Bases de Concreto	
Materiais	Proporção
Cimento	1
Areia Fina	1,69
Areia Média	0,72
Brita 1	2,27
Aditivo Superplastificante	0,01
a/c	0,389

A altura de compósito utilizada neste estudo segue as mesmas dimensões do trabalho do Rodríguez (em fase de elaboração)<sup>3</sup>, que visa a confecção de pistas experimentais de compósitos de elevada capacidade de deformação. Assim as alturas estudadas foram de 2, 3 e 5 cm. O procedimento de arrancamento segue as recomendações da Norma NBR 13528 (ABNT, 2010): Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da aderência à tração e é estudado na idade de 28 dias. Foi utilizado um método de ensaio referente à aderência de revestimentos devido à inexistência de normas específicas para pavimentos. A Tabela 15 detalha a estratégia experimental deste ensaio. A Figura 38 esquematiza o ensaio de arrancamento e a Figura 39(a) detalha uma das etapas do procedimento do ensaio, que são os cortes realizados até o substrato de concreto no diâmetro de 50 mm e a Figura 39(b) o processo de colagem do disco de metal com resina epóxi sobre os cortes.

Tabela 15– Estratégia experimental – aderência pelo método de arrancamento.

Aderência pelo Método de Arrancamento	
Dimensões (Base de Concreto)	250 x 500 x 50 mm
Tratamento Superficial	Não
Idades de Arrancamento	28 dias
Amostras Ensaçadas	10 cortes
Altura do Recobrimento	2, 3 e 5 cm

<sup>3</sup> Tese em fase de elaboração com título “Avaliação do comportamento mecânico do ECC (Engineered Cementitious Composites) no recapeamento de pavimentos” do autor Camilo Andrés Muñoz Rodríguez, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Doutorado em Engenharia Civil), Orientador Washigton Peres Núñez com previsão de publicação em 2017, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

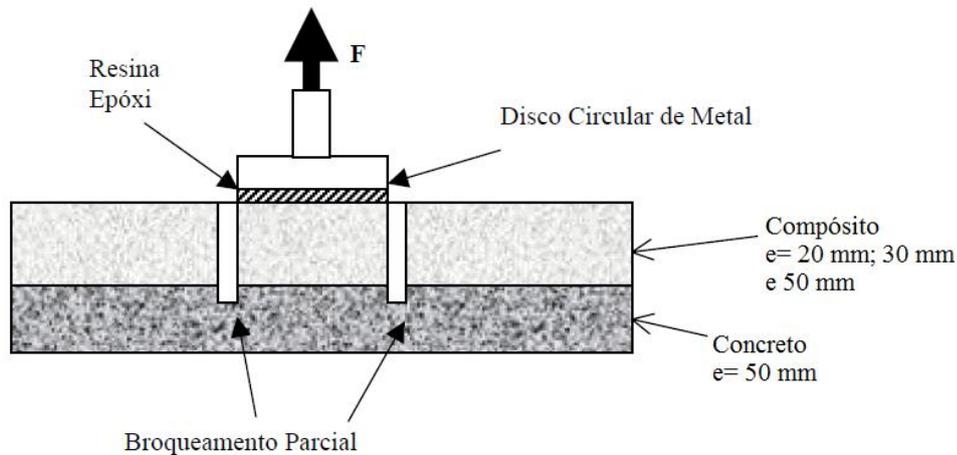


Figura 38– Esquema do ensaio de arrancamento.



Figura 39 – Etapas do ensaio (a) cortes com o diâmetro de 50 mm; (b) colagem dos discos com resina epóxi.

#### 5.5.4 Aderência Pelo Método de Cisalhamento Oblíquo

Outro método utilizado neste estudo para avaliar a aderência entre compósito-concreto é o método de cisalhamento oblíquo. Apesar do método de ensaio não ser específico para aplicações de pavimentação, foi utilizado para fins de comparação entre os compósitos estudados.

O ensaio consiste em confeccionar corpos de prova misto. Ou seja, primeiramente realizou-se a moldagem do concreto de base, em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 72 mm de diâmetro e 144 mm de altura. Para este ensaio o concreto de base foi o mesmo concreto do ensaio anterior (item 5.5.4). Após 14 dias de cura foi realizado um corte no ângulo de 30° nos corpos de prova, que foram colocados novamente nas fôrmas para que fosse moldada a outra

parte com compósito sobre a base já existente (Figura 40). A Tabela 16 detalha a estratégia experimental para a realização deste ensaio.

Tabela 16– Estratégia experimental – ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo.

Aderência pelo Método de Cisalhamento Oblíquo	
Dimensões do Corpo de Prova	d: 72 mm e h: 144 mm
Tratamento Superficial	Não
Idades de Ruptura	28 dias
Amostras Ensaçadas	5 por tipo compósito

Este ensaio seguiu os métodos da Norma ASTM C882: Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear<sup>1</sup>.

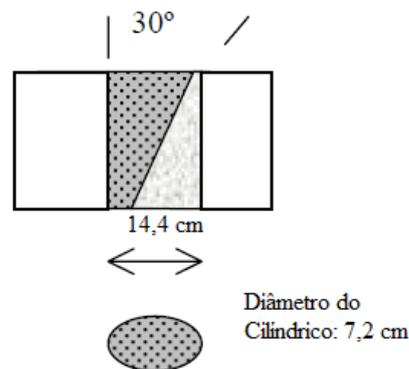


Figura 40– Esquematização do corpo de prova para ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo.

Com o intuito de analisar a propagação das fissuras desenvolvidas pelo processo de compressão nos corpos de prova de aderência por cisalhamento oblíquo, foi realizado primeiramente o mapeamento destas fissuras e com a utilização de um fissurômetro, a abertura das mesmas foi computada, conforme a Figura 41.

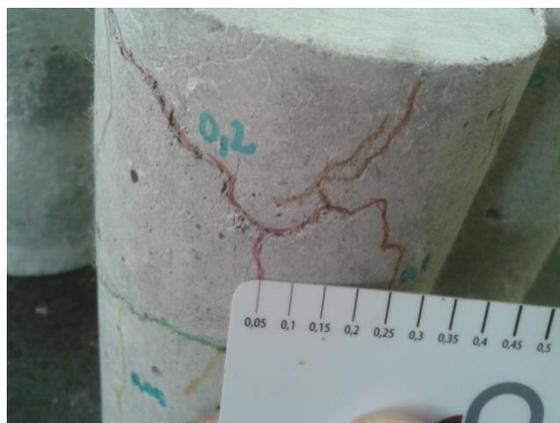


Figura 41 - Processo de mapeamento de fissuras no corpo de prova misto.

### 5.5.5 Reflexão de Fissuras

Buscando investigar a influência da ductilidade na resistência à fissuração refletiva do compósito se utilizou o método de Quian (2007), através de ensaio de flexão estática. Neste ensaio os corpos de prova são formados por duas camadas – compósito cimentício de elevada capacidade de deformação e substrato de concreto, constituindo vigas compostas. Este ensaio também foi realizado prevendo uma possível aplicação dos compósitos para reabilitação de pavimentos de concreto.

As bases dos corpos de prova, com dimensões de 355 x 150 x 50 mm, também foram moldadas com o mesmo concreto utilizado nos ensaios de aderência. Após o processo de desmoldagem e um período de cura de 14 dias, foi realizado um corte na transversal na região central, com o auxílio de uma serra diamantada, resultando em dois blocos de 355 x 75 x 50 mm. Esses dois blocos serviram de base para a colocação do compósito. Nas duas faces resultantes do corte transversal foi colada uma fita, com a finalidade de assegurar a existência de uma fissura entre os blocos de uma mesma base. Após esse processo foi lançada a camada de compósito nas espessuras de 2, 3 e 5 cm. A Tabela 17 detalha a estratégia experimental para a realização deste ensaio.

Tabela 17– Estratégia experimental – ensaio de reflexão de fissuras.

Reflexão de Fissuras	
Dimensões (Base de Concreto)	355 x 75 x 50mm
Tratamento Superficial	Não
Idades de Ruptura	28 dias
Amostras Ensaaiadas	3 por tipo de compósito
Altura do Recobrimento	2, 3 e 5 cm

A Figura 42 demonstra o procedimento para ruptura dos corpos de prova ensaiados. Observa-se a existência de uma região de momento constante no centro do vão, resultante do carregamento de quatro pontos favorecendo a ocorrência de delaminação ao longo da interface concreto-compósito (GARCEZ, 2009). A Figura 43(a) ilustra o corpo-de-prova instrumentado no suporte de flexão à quatro pontos e a Figura 43(b) ilustra o posicionamento do LVDT para a realização das leituras de deslocamento vertical. O LVDT utilizado possui curso máximo de 5 mm.

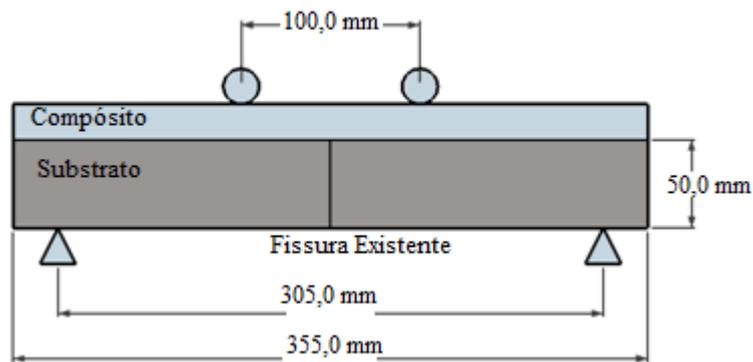


Figura 42– Configuração do corpo de prova para resistência à fissuração refletiva.

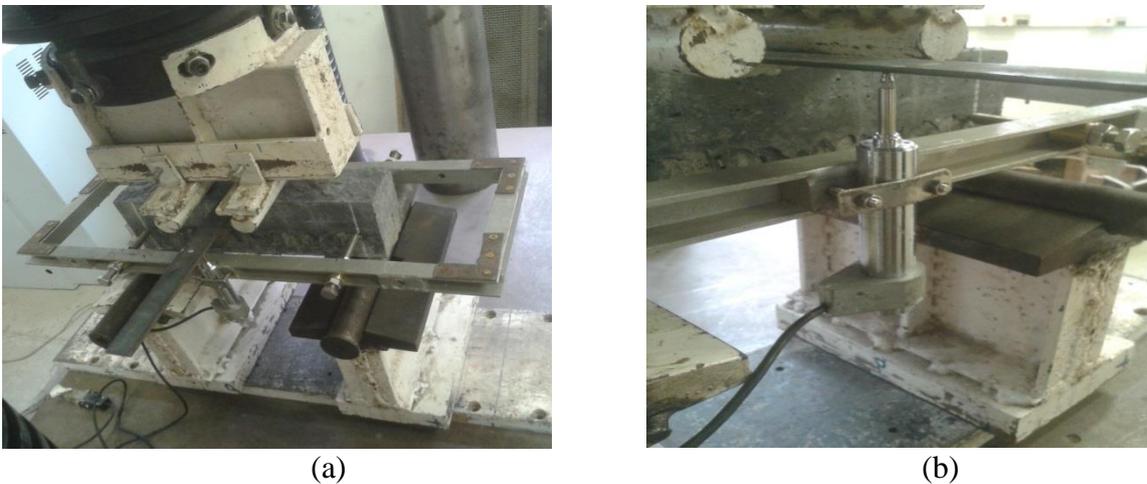


Figura 43 - Ensaio de reflexão de fissuras; (a) corpo-de-prova instrumentado; (b) posicionamento do LVDT.

### 5.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução. É limitado pelo diâmetro do feixe de elétrons e o microvolume de interação com a amostra. Para a realização do ensaio de MEV, utilizou-se a infraestrutura do Centro de Microscopia Eletrônica (CME), pertencente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que dispõe de um microscópio marca JEOL 5800 (Figura 44). A preparação das amostras consiste, basicamente, em cortar pedaços dos compósitos para que sejam dispostos sobre um adesivo de carbono e, posteriormente metalizados por uma fina camada de ouro, pois o compósito não tem caráter condutor. Neste trabalho, a microscopia eletrônica de varredura é utilizada para análise da interface entre a fibra e a matriz dos compósitos cimentícios.



Figura 44 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Este capítulo apresentou o delineamento do programa experimental e como os ensaios foram sendo desenvolvidos ao longo de cada fase do programa. O capítulo na sequência apresenta os resultados obtidos ao longo de todas as fases do programa experimental, bem como a análise dos resultados obtidos.

## 6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do programa experimental. Além disso, também apresenta uma análise dos resultados encontrados visando atingir o objetivo principal e os objetivos específicos desta pesquisa.

### 6.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS DA CINZA DE CASCA DE ARROZ

Neste item são descritos os resultados da caracterização da cinza de casca de arroz estudada nesta dissertação. Através destes resultados é possível estabelecer critérios de avaliação da CCA e determinar se a mesma se enquadra na caracterização de material pozolânico.

#### 6.1.1 Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resultados de Fluorescência de Raio-x das cinzas de casca de arroz estudadas (para os tempos de moagem de 1h, 2h, 4h, 6h e 8h) estão dispostas na Tabela 18. A composição química das cinzas de casca de arroz estudadas obtiveram a presença dominante de dióxido de silício, cerca de 85% em todos os tempos de moagem, este valor encontra-se igual ao encontrado na literatura, que normalmente é de 80 à 90%, conforme descrito por Cordeiro (2009) e Pouey (2006). Além disso, as amostras apresentam óxidos metálicos como impurezas. O cátion  $K^+$  ( $K_2O$ ) é o principal contaminante da cinza. É importante destacar que antes dos ensaios de caracterização, as amostras não obtiveram nenhum procedimento de limpeza e separação.

Tabela 18 - Fluorescência de raio-X das CCAs estudadas.

Composição Química					
Composição	CCA - 1H (%)	CCA - 2H (%)	CCA - 4H (%)	CCA - 6H (%)	CCA - 8H (%)
SiO <sub>2</sub>	85,92	83,65	82,08	82,39	82,21
K <sub>2</sub> O	1,88	1,93	1,85	1,84	1,85
CaO	0,81	0,83	0,93	0,71	0,75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,55	0,62	0,69	0,63	0,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	0,23	0,24	0,43	0,48
MnO	0,50	0,51	0,30	0,34	0,34
SO <sub>3</sub>	0,16	0,09	0,18	0,18	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06	0,05	0,13	0,09	0,10
CO <sub>2</sub>	9,78	11,76	12,96	12,92	12,96

Segundo a Norma NBR 12653 (ABNT, 2014), para um material ser considerado um material pozzolânico, o mesmo deve atender as recomendações dispostas na Tabela 19. Nota-se que todas as cinzas de casca de arroz atenderam ao requisito mínimo exigido pela norma na composição química:  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  que é de no mínimo 70%. Com a composição química da CCA estudada já é possível perceber que esta cinza possui potencial pozzolânico bem alto, devido ao seu alto teor de sílica. Com os resultados do ensaio de difração de raio-x, descrito na sequência, será possível constatar a pozzolanicidade das cinzas estudadas.

Tabela 19 – Requisitos mínimos da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2014)		
Propriedades	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$
NBR 12653/14	$\geq 70$	$\leq 4$
CCA - 1H (%)	86,38	0,16
CCA - 2H (%)	83,93	0,09
CCA - 4H (%)	82,45	0,18
CCA - 6H (%)	82,91	0,18
CCA - 8H (%)	82,79	0,19

### 6.1.2 Difração de Raio-X

A técnica de difração de raios é indicada na determinação das fases cristalinas presentes nos materiais, ou seja, é utilizada para se obter informações sobre a estrutura, composição e estado de materiais policristalinos. Desta forma, a Figura 45 apresenta os resultados obtidos para a cinza sem controle de temperatura de queima nas moagens de 1 hora, 2 horas, 4 horas, 6 horas e 8 horas. Nota-se que os difratogramas apresentam uma uniformidade entre as amostras analisadas e também apresentam picos cristalinos característicos, indicando que o material analisado não é totalmente amorfo, pois apresenta alguma cristalinidade. Sabe-se que cinzas provenientes de combustão não controlada geralmente contêm uma grande proporção de minerais de sílica não reativos (cristalinos) e de baixo valor pozzolânico. A presença de sílica cristalina sugere que temperaturas de queima superiores a  $800^\circ\text{C}$  foram alcançadas na caldeira.

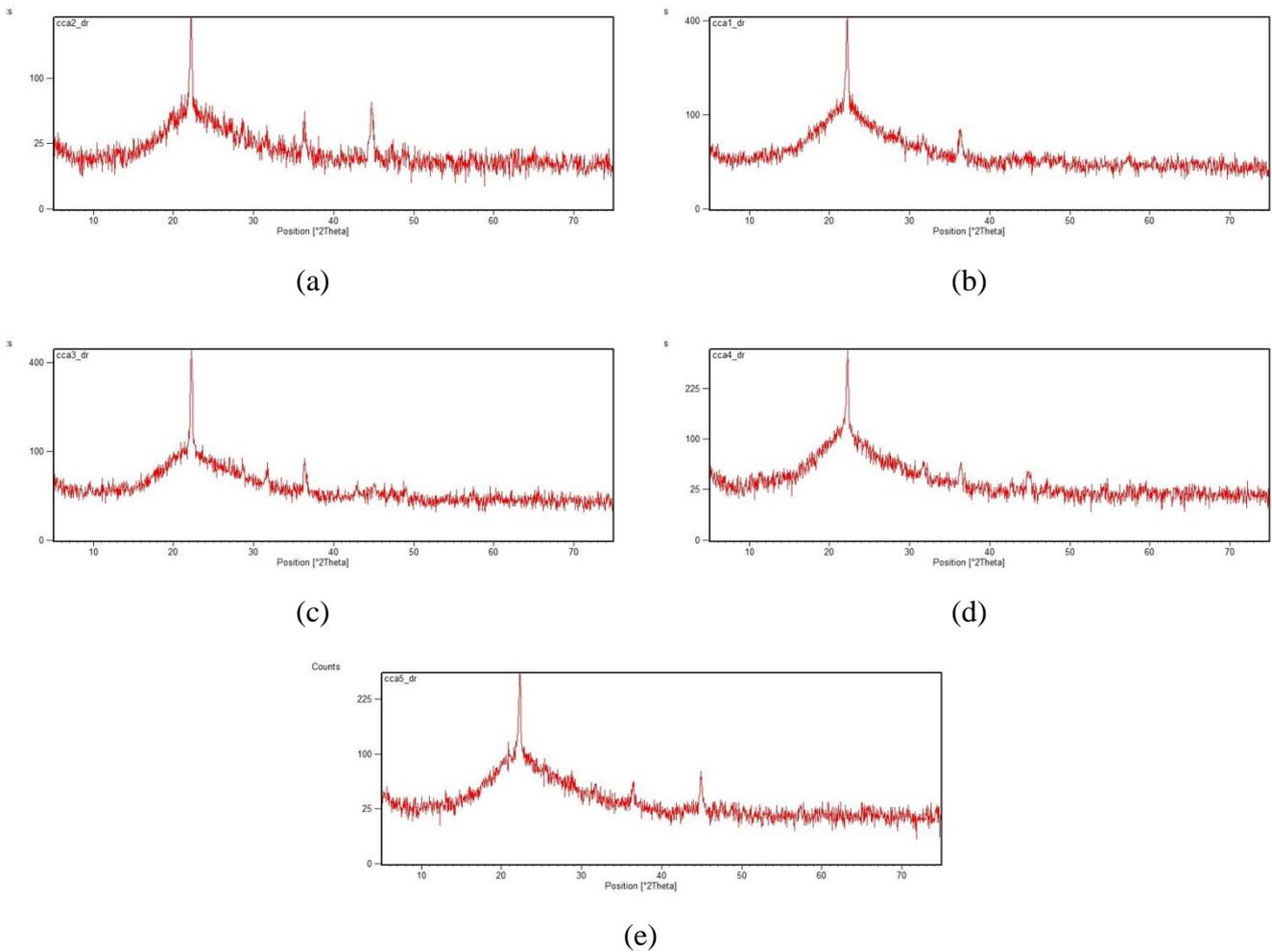


Figura 45– Difração de raio-x das amostras de CCA – (a) CCA 1 hora de moagem (b) CCA 2 horas de moagem (c) CCA 4 horas de moagem (d) CCA 6 horas de moagem (e) CCA 8 horas de moagem.

### 6.1.3 Perda ao Fogo

A Tabela 20 apresenta os resultados do ensaio de verificação da perda ao fogo, realizado segundo as recomendações da NBR NM 18 (ABNT, 2012). A NBR 12653 (ABNT, 2014): Materiais Pozolânicos limita a perda ao fogo em no máximo 10%. Verifica-se que todas as cinzas de casca de arroz não atenderam o limite máximo exigido por esta norma. Para CCA residual (sem controle de queima) é muito comum valores elevados de carbono, justamente devido a esta queima sem controle. Fato comprovado pelo ensaio de fluorescência de raio-x, onde foi possível verificar que a quantidade de dióxido de silício foi baixa e que existe uma grande porcentagem de dióxido de carbono.

Tabela 20 – Perda ao fogo das amostras de CCA.

Amostra	Perda ao Fogo (%)	Limite da NBR 12653 (ABNT, 2014)
CCA - 1 hora de moagem	14,54	
CCA - 2 horas de moagem	15,43	
CCA - 4 horas de moagem	19,44	Máximo 10%
CCA - 6 horas de moagem	12,95	
CCA - 8 horas de moagem	13,99	

#### 6.1.4 Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias, em Relação ao Controle

Os resultados encontrados no ensaio de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, seguindo as recomendações da norma NBR 5752 (ABNT, 2014), bem como as resistências médias encontram-se na Tabela 21.

A argamassa de referência produzida para comparação entre os tipos de CCA obteve resistência média, aos 28 dias, de 19,29 MPa.

Observa-se a partir desses resultados (Tabela 21) que os índices de desempenho para todas as cinzas estudadas encontram-se em conformidade com a Norma NBR 12653 (ABNT, 2014), ou seja, as cinzas obtiveram valores superiores aos 90%.

Tabela 21 - Índice de desempenho da CCA.

Tipo De CCA	Resistência (MPa)	Índice de Desempenho (%)	Limite da NBR 12653 (ABNT, 2014)
CCA - 1 hora	23,09	120,00	
CCA - 2 horas	20,22	105,08	
CCA - 4 horas	33,55	174,37	≥ 90%
CCA - 6 horas	31,71	164,84	
CCA - 8 horas	31,26	162,48	

Verifica-se que existe uma tendência de que, com o aumento do tempo de moagem, exista um aumento na resistência à compressão, indicando que a moagem favorece a atividade pozolânica da cinza de casca de arroz. Também é possível perceber que a partir da moagem de 4 horas houve um ganho no índice de desempenho destas cinzas em comparação com as cinzas moídas por 1 e 2 horas, praticamente chegando a um acréscimo de até 80% a mais do que exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), que é de 90%.

### 6.1.5 Massa específica

A Tabela 22 apresenta as determinações das massas específicas das CCA. Os valores obtidos são semelhantes aos encontrados na literatura, ou seja, normalmente a CCA sem controle de queima apresenta valores de massa específica mais elevados que a com controle de queima. Na literatura os valores de massa específica variam na faixa de 1,88 a 2,11 g/cm<sup>3</sup>. Ou seja, os valores encontrados para as cinzas estudadas encontram-se dentro da faixa estabelecida pela literatura.

Tabela 22 – Massa específica das amostras de CCA.

Amostras	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
CCA - 1 hora de moagem	1,98
CCA - 2 horas de moagem	2,01
CCA - 4 horas de moagem	2,03
CCA - 6 horas de moagem	2,04
CCA - 8 horas de moagem	2,06

### 6.1.6 Distribuição Granulométrica

A Figura 46 mostra a distribuição granulométrica por difratometria a laser das CCAs sem controle de temperatura na queima. Observa-se que as amostras CCA com 1 hora de moagem e 2 horas de moagem possuem uma distribuição com concentração de partículas de 100 µm, com diâmetro médio das partículas de 33,15 µm e 22,29 µm, respectivamente, Figura 46(a) e (b).

As cinzas de casca de arroz com 4 horas de moagem, 6 horas de moagem e 8 horas de moagem (Figura 46(c) (d) e (e)) obtiveram uma redução maior do tamanho da partícula da ordem de 27% em relação a CCA 1 hora de moagem. Para essas três cinzas de casca de arroz a distribuição granulométrica encontra-se com concentração de partículas em 10 µm. A CCA 4 horas de moagem obteve um diâmetro médio de 7,29 µm, já a CCA 6 horas de moagem apresentou um diâmetro médio de 9,30 µm e a CCA 8 horas um diâmetro médio de 3,59 µm. Com este resultado, pode se perceber que parece ter havido um ruído experimental para a CCA 6 horas, pois o tempo de moagem apresenta uma relação inversa ao tamanho da partícula, ou seja, com o aumento do tempo de moagem o tamanho da partícula tende a ser menor.

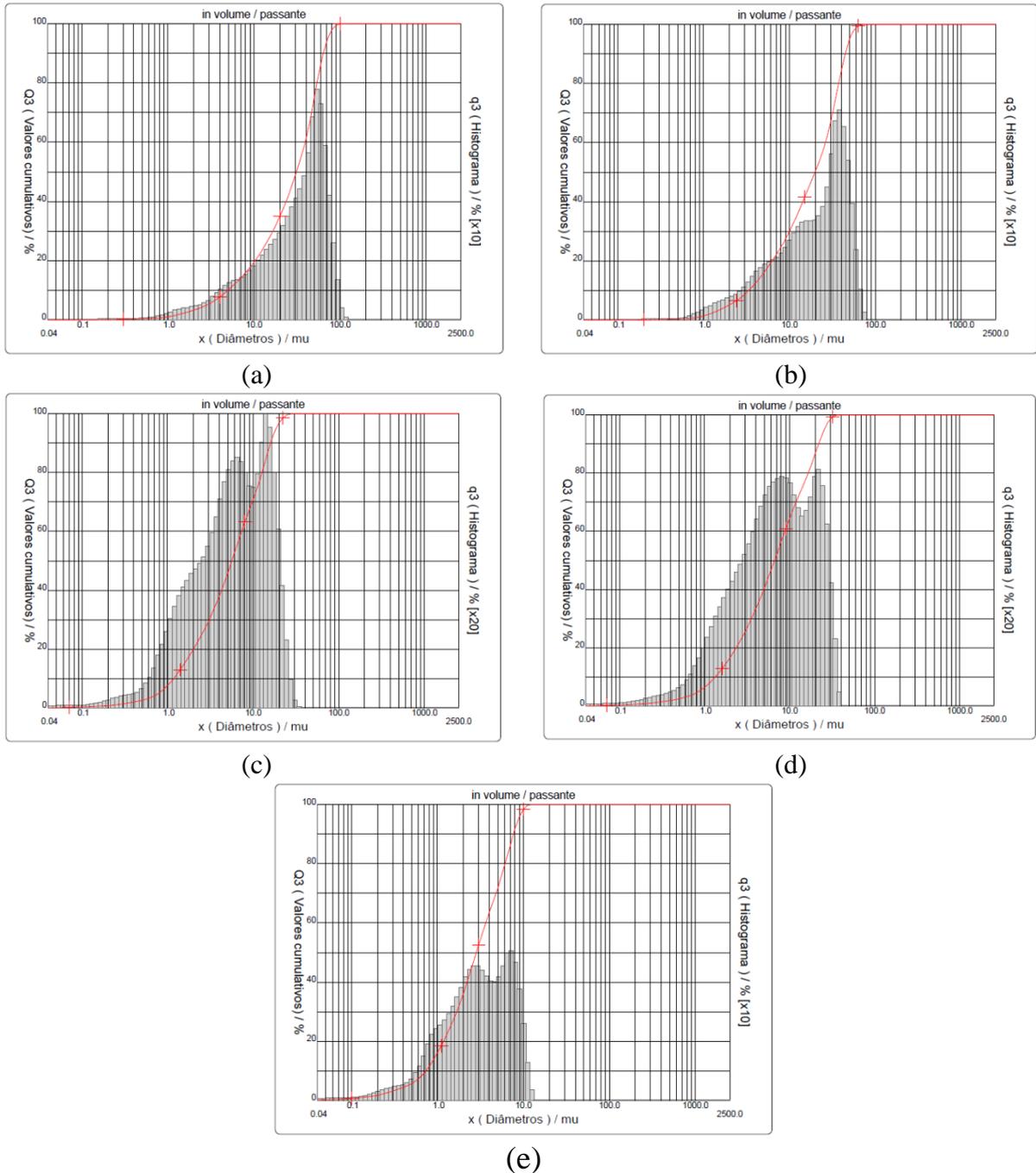


Figura 46– Curva granulométrica das amostras de CCA (a) 1 hora de moagem (b) 2 horas de moagem (c) 4 horas de moagem (d) 6 horas de moagem (e) 8 horas de moagem.

## 6.2 CARACTERÍSTICA MECÂNICA DOS COMPÓSITOS COM CCA

Para os resultados de caracterização mecânica dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação foram realizados levantamentos qualitativos e quantitativos dos dados no intuito de selecionar os traços com resultados mais satisfatórios.

A idade de ruptura adotada para estes compósitos foi de 28 dias. Não foram estudadas idades mais avançadas devido à elevada atividade pozolânica da cinza de casca de arroz, que pode ser verificada no item 6.1.4 desta dissertação. Este fato também pode ser comprovado em estudos paralelos realizados no LEME, como o de Pereira da Costa (2015)<sup>4</sup>, que analisa a durabilidade destes compósitos e verifica que não há diferença significativa entre as idades de 28 dias e 91 dias.

Uma das análises do comportamento mecânico dos compósitos consistiu na quantificação do comportamento *strain-hardening* dos corpos de prova ensaiados. Desta maneira, este trabalho desenvolveu uma proposta para a determinação do coeficiente de deformação, conforme detalhado na sequência.

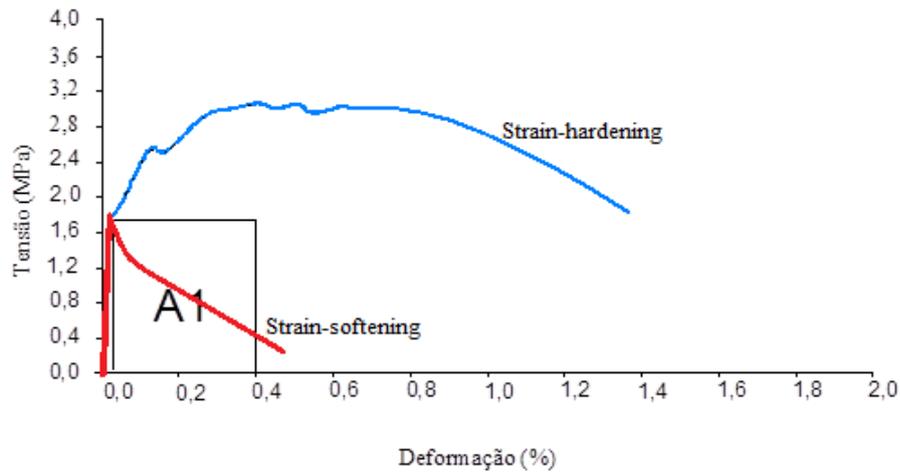
Para o cálculo do coeficiente de deformação foram estabelecidas deformações fixas no intuito de comparação entre os traços. Para o ensaio de tração direta foram utilizadas as deformações de 0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,4% e para o ensaio de flexão a quatro pontos as deformações estabelecidas foram de 1%, 2%, 3% e 4%. O método proposto consiste na relação entre a área sob a curva dos corpos de prova a partir da abertura da primeira fissura até as deformações estabelecidas ( $A2'$ ) por uma área fictícia ( $A1$ ), que considera um comportamento ideal em que a curva se mantém com tensão constante após a primeira fissuração, detalhadas na equação 3. Para a determinação da  $A2'$  foi adotada a soma das duas áreas fictícias, a  $A1$  que é a área abaixo da primeira fissura e a  $A2$  que é acima da primeira fissura até as determinações estabelecidas.

A Figura 47 (a) ilustra como foi determinada a área 1 ( $A1$ ) e a Figura 47 (b) a área 2' ( $A2'$ ), citando como exemplo um corpo de prova da mistura de ECC referência para uma deformação pré-estabelecida de 0,4%. Após determinadas às áreas, o cálculo do coeficiente se fez pela divisão das duas áreas, conforme fórmula a seguir.

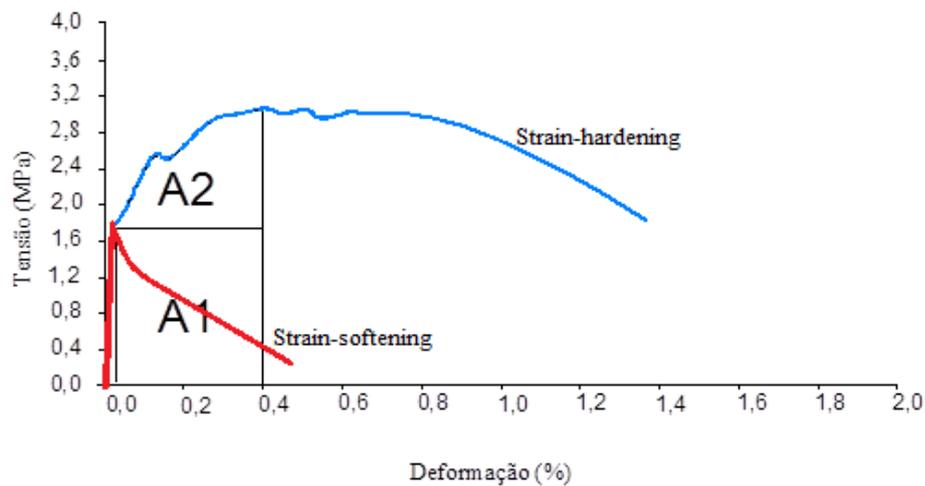
$$\text{Coeficiente} = \frac{A2' = (A1+A2)}{A1} \text{ (Equação 3)}$$

---

<sup>4</sup> Dissertação em fase de elaboração com título “Análise da Durabilidade dos Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação Reforçados com Fibras” da autora Fernanda Bianchi Pereira da Costa, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (Mestrado em Engenharia Civil), Orientador Luiz Carlos Pinto da Silva Filho com previsão de publicação em 2015, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.



(a)



(b)

Figura 47 - Cálculo do coeficiente (a) área 1 (b) área 2.

Para os resultados do coeficiente acima de 1,0 é considerado o comportamento *strain-hardening*, ou seja, a resistência pós-fissuração na tração uniaxial ou flexão é maior ou igual à resistência de fissuração. E para coeficientes abaixo de 1,0 é considerado o comportamento *strain-softening*, este comportamento é caracterizado como uma perda da capacidade resistente progressiva após a primeira fissuração da matriz.

Além do coeficiente de deformação, foram obtidos outros parâmetros dos ensaios realizados, conforme será detalhado nos itens a seguir.

### 6.2.1 Tração Direta

A Tabela 23 mostra os resultados obtidos para o ensaio de tração direta para todos os traços estudados na etapa de caracterização mecânica destes compósitos, de acordo com a tensão de abertura da primeira fissura, tensão máxima, número de fissuras e coeficiente de deformação. Cabe lembrar que todos os gráficos de tensão x deformação estão disponíveis no Apêndice A desta dissertação. Para o cálculo do coeficiente foram adotadas as deformações de 0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,4%. Também é necessário esclarecer que devido a este ensaio ter um procedimento de execução bem delicado, e por se tratar de ensaios laboratoriais, ocorreram alguns erros experimentais nesta fase e alguns traços foram prejudicados devido à perda de corpos de prova, tanto na execução do ensaio, quanto a problemas externos que favoreceram a existência de problemas experimentais. Na Tabela 23, o símbolo (-) caracteriza a perda do corpo de prova para análise.

Para o traço referência, em média a abertura da primeira fissura apareceu em torno de 1,50 MPa de tensão. A tensão média máxima alcançada neste traço foi de 3 MPa. Em relação ao coeficiente de deformação nota-se que na deformação de 0,4% todos os corpos de prova obtiveram um valor de coeficiente superior a 1,0, caracterizando que o comportamento *strain-hardening* está se desenvolvendo. Existe uma suave tendência de que o coeficiente aumente a medida que ocorre um aumento das deformações.

Para os traços com cinza de casca de arroz moída por 1 hora, os resultados da mistura com porcentagem de 10% de substituição mostram que a abertura de fissura média ocorreu em 1,45 MPa, e que a tensão máxima foi de 2,90 MPa. Percebeu-se que, para esta porcentagem, o coeficiente de deformação aumenta conforme aumenta a deformação. Na porcentagem de 20% o mesmo comportamento da porcentagem de 10% se repete, ou seja, existe um aumento do valor do coeficiente conforme o aumento das deformações. A porcentagem de 20% alcançou deformações máximas médias de 3 MPa e abertura de fissuras em torno de 2,5 MPa. Em contrapartida a este comportamento, a porcentagem de 30% apresentou comportamento *strain-softening* em todos os corpos de prova. A tensão máxima obtida nessa porcentagem foi a mesma da abertura da primeira fissura, ou seja, após a abertura da primeira fissura os corpos de prova apresentaram uma perda de desempenho conforme o aumento das deformações. Acredita-se que este comportamento tenha ocorrido devido ao deslizamento da fibra na matriz cimentícia.

A cinza de casca de arroz moída por 2 horas apresentou resultados na porcentagem de 10% conflitantes, devido ao fato de que dois corpos de prova apresentaram o comportamento *strain-softening* e um corpo de prova apresentou o comportamento *strain-hardening*. Acredita-se que este conflito ocorreu devido a erros experimentais como falta de luz, deslocamento de materiais para outro laboratório e deve ser mais bem investigado. Na porcentagem de 20% o comportamento *strain-hardening* se confirma em todos os corpos de prova, com tensões máximas na média de 2,5 MPa com abertura de fissuras em torno de 2 MPa. Já na porcentagem de 30%, o comportamento *strain-hardening* se evidencia em três corpos de prova e em um corpo de prova o comportamento *strain-softening* se repete. Acredita-se que o corpo de prova que apresentou *strain-softening* seja oriundo de um ruído experimental.

A cinza de casca de arroz moída por 4 horas apresentou resultados bem semelhantes entre as porcentagens estudadas. Na porcentagem de 10% é possível perceber que os resultados encontrados para o coeficiente apresentaram similaridade entre os dois corpos de prova, ou seja, a medida que aumentava a deformação o comportamento *strain-hardening* se desenvolvia de forma mais acentuada, mostrado pelo aumento do valor do coeficiente. A abertura da primeira fissura ocorreu em média com 1 MPa e tensão máxima de 2 MPa. Com a porcentagem de 20% esse comportamento se repete, com tensão máxima em torno de 2,5 MPa e uma abertura de fissuras em média de 1,5 MPa. Para a porcentagem de 30% todos os corpos de prova apresentaram um comportamento semelhante, assim confirmando a tendência de comportamento *strain-hardening* bem evidente, pois existe o aumento do valor do coeficiente a medida que aumentam as deformações, com uma estabilização na deformação de 1,2%. Desta maneira, é possível ter uma previsão em quais deformações o comportamento *strain-hardening* fica mais evidente, com seus ganhos e perdas. A porcentagem de 30% com a CCA moída por 4 horas foi escolhida para a continuidade dos ensaios desta dissertação devido ao seu bom desempenho mecânico, e também no intuito de trabalhar com uma cinza que dependa de menor custo energético para a moagem da mesma (em comparação com os demais tempos de moagem de 6h e 8h).

Tabela 23 - Caracterização mecânica - tração direta.

Ensaio:		Tração Direta							
Traço	CP	Tensão de Abertura de 1ª Fissura (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Nº de Fissuras	Coefficiente (Deformação 0,4%)	Coefficiente (Deformação 0,8%)	Coefficiente (Deformação 1,2%)	Coefficiente (Deformação 1,4%)	Comportamento
ECC-Ref	1	1,62	3,08	14	2,26	2,06	1,94	*	Strain-hardening
	2	1,69	2,54	8	1,32	1,42	1,45	1,43	Strain-hardening
	3	1,55	3,42	6	1,67	1,96	*	*	Strain-hardening
	4	1,23	1,65	10	1,41	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%1H	1	1,80	2,87	9	3,41	2,69	4,03	*	Strain-hardening
	2	1,18	3,01	11	1,44	1,52	*	*	Strain-hardening
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%1H	1	2,4	3,11	4	1,12	1,23	*	*	Strain-hardening
	2	1,92	2,73	6	1,32	3,19	*	*	Strain-hardening
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	3,28	3,31	3	1,21	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%1H	1	4,17	4,17	5	0,96	*	*	*	Strain-softening
	2	2,29	2,29	5	0,73	0,72	*	*	Strain-softening
	3	3,92	3,92	4	0,87	0,84	*	*	Strain-softening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-10%2H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0,88	1,89	7	0,63	1,10	1,00	0,97	Strain-softening
	3	1,05	2,00	5	1,32	1,73	*	*	Strain-hardening
	4	1,70	1,69	4	0,46	0,47	0,49	0,50	Strain-softening
ECC-CCA-20%2H	1	1,79	2,31	2	1,08	1,19	1,18	1,17	Strain-hardening
	2	2,01	2,12	6	1,15	*	*	*	Strain-hardening
	3	1,86	2,73	11	1,56	1,43	1,39	*	Strain-hardening
	4	2,48	2,78	5	1,31	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%2H	1	1,90	2,38	3	1,01	1,09	*	*	Strain-hardening
	2	1,84	2,29	3	1,18	2,78	*	*	Strain-hardening
	3	1,68	1,68	2	0,96	0,91	0,49	0,24	Strain-softening
	4	1,88	2,65	5	1,29	1,38	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%4H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	1,18	2,12	3	2,79	3,11	4,86	*	Strain-hardening
	4	1,11	2,17	4	1,57	1,70	1,73	*	Strain-hardening
ECC-CCA-20%4H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	1,11	2,05	6	1,19	5,90	3,97	3,35	Strain-hardening
	4	1,94	2,94	6	1,33	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%4H	1	2,94	2,96	5	1,01	1,16	1,13	*	Strain-hardening
	2	1,71	2,31	4	1,94	1,61	1,52	*	Strain-hardening
	3	1,76	1,81	3	1,14	1,23	1,26	1,26	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-10%6H	1	2,46	2,53	4	1,89	1,25	*	*	Strain-hardening
	2	1,86	2,46	4	1,09	2,08	1,86	*	Strain-hardening
	3	1,87	2,38	4	3,17	*	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%6H	1	2,20	3,02	9	1,37	1,35	1,25	1,19	Strain-hardening
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	2,58	3,28	9	1,24	1,25	1,21	1,17	Strain-hardening
	4	1,39	2,49	6	1,53	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%6H	1	2,87	2,87	17	0,98	0,95	*	*	Strain-softening
	2	0,73	1,54	7	1,90	3,84	3,44	*	Strain-hardening
	3	2,42	2,86	15	0,56	0,58	*	*	Strain-softening
	4	1,69	2,64	9	1,27	1,40	1,40	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%8H	1	1,31	2,12	1	1,59	*	*	*	Strain-hardening
	2	1,16	2,71	3	2,98	2,62	*	*	Strain-hardening
	3	2,19	3,09	7	2,89	2,06	*	*	Strain-hardening
	4	1,97	3,52	8	1,22	1,52	1,53	*	Strain-hardening
ECC-CCA-20%8H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	2,47	3,81	7	3,88	4,35	7,29	6,39	Strain-hardening
	3	1,70	3,0	11	3,05	3,84	2,95	2,67	Strain-hardening
	4	1,59	2,7	5	2,91	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%8H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	2,78	2,77	13	1,71	1,74	1,71	1,68	Strain-hardening
	3	1,05	2,61	8	1,93	5,53	*	*	Strain-hardening
	4	1,85	2,64	8	1,17	1,31	1,35	*	Strain-hardening

A Tabela 23 também mostra os resultados obtidos pela cinza de casca de arroz moída por 6 horas. Para a porcentagem de 10%, percebe-se que o comportamento *strain-hardening* ocorre na primeira deformação estudada. Com o aumento das deformações ocorre uma diminuição do coeficiente. Para a porcentagem de 20% este comportamento novamente se repete, demonstrando o ápice do comportamento *strain-hardening* nas primeiras deformações. Na porcentagem de 30%, dois corpos de prova apresentaram comportamento *strain-softening* e dois apresentaram comportamento *strain-hardening*. Na caracterização desta cinza, no ensaio de granulometria, percebeu-se que o diâmetro da mesma não condiz com seu tempo de moagem, já indicando que houve um ruído experimental, assim estes resultados não podem ser afirmados e por este motivo esta cinza foi descartada dos resultados satisfatórios.

A cinza de casca de arroz moída por 8 horas foi a cinza que apresentou maiores valores do coeficiente de deformação, já indicando o tempo de moagem ideal para ser adicionado a estes compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. A porcentagem de 10% apresentou a abertura da primeira fissura em torno de 1,65 MPa, com tensões máximas de 2,86 MPa. Em relação ao coeficiente de deformação, seus maiores valores se deram nas primeiras deformações. A porcentagem de 20% foi o traço que apresentou maiores valores do coeficiente, inclusive permitindo o seu cálculo para a deformação máxima de 1,4%. A abertura da primeira fissura ocorreu em média de 1,8 MPa, com tensões máximas em torno de 3 MPa. A porcentagem de 30% demonstrou um comportamento muito semelhante à porcentagem de 20%, e também apresentou um aumento do coeficiente conforme ocorreu o aumento das deformações. Esta porcentagem foi a que apresentou o maior número de fissuras, caracterizando também o desenvolvimento do comportamento *strain-hardening*. A abertura da primeira fissura ocorreu em tensões médias de 1,9 MPa e tensões máximas por volta de 2,6 MPa. Esta cinza de casca de arroz, quando inserida aos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, apresentou os melhores resultados mecânicos.

Para avaliar o indicativo de ductilidade destes compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação foi realizada uma análise qualitativa dos traços estudados. Foram adotadas as deformações de 0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,4%. A Figura 48 apresenta a quantidade de corpos de prova (em porcentagem) que atingiram as deformações determinadas. De maneira geral, pode-se perceber que as deformações iniciais (0,4% e 0,8%) foram as que apresentaram maior número de corpos de prova, ou seja, nestas deformações o indicativo de ductilidade desses compósitos se desenvolve com maior potencial. Uma menor quantidade de corpos de prova conseguiram atingir as deformações de 1,2% e 1,4%.

Como já analisado com o valor do coeficiente de deformação, também pode-se perceber que o indicativo de ductilidade do traço referência diminui a medida que se aumenta as deformações. Ou seja, todos os corpos de prova atingiram deformações de 0,4% e apresentaram uma redução gradativa do número de corpos de prova capazes de atingir deformações maiores.

Para a cinza de casca de arroz moída por 1 hora, em todas as porcentagens, percebe-se que os corpos de prova atingiram apenas deformações de 0,4% e 0,8%, com exceção da porcentagem de 10% que teve um corpo de prova que atingiu a deformação de 1,2%.

O indicativo de ductilidade para a CCA moída por 2 horas se mostra mais evidente, pois em todas as porcentagens de substituição, os corpos de prova atingiram todas as deformações estudadas, de 0,4% até 1,4%, demonstrando que este traço tem a capacidade de atingir maiores deformações.

Analisando a Figura 48, a CCA moída por 4 horas obteve um indicativo de ductilidade muito semelhante à CCA moída por 2 horas, ou seja, os corpos de prova atingiram todas as deformações estudadas. A porcentagem de 30% ganha destaque por apresentar um indicativo de ductilidade maior em relação ao traço referência, pelo fato de que todos os corpos de prova atingiram as deformações de 0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,4%.

Para a CCA moída por 6 horas o indicativo de ductilidade obteve seu maior desempenho nas primeiras deformações (0,4% e 0,8%). Para deformações maiores (1,2% e 1,4%) obteve uma perda de desempenho, indicando que esta CCA em deformações maiores seu comportamento acaba sendo comprometido. Salienta-se, entretanto, como já mencionado anteriormente, parece ter havido algum problema de moagem nesta cinza não se podendo garantir que a cinza foi realmente moída pelo período de 6 horas.

A cinza de casca de arroz moída por 8 horas apresentou um indicativo de ductilidade superior ao traço referência em todas as porcentagens estudadas, com exceção da porcentagem de 10% que não atingiu a deformação de 1,4%. Em relação às porcentagens de 20% e 30% nota-se que o indicativo de ductilidade é maior que o traço referência, ou seja, os corpos de prova nestas porcentagens atingiram deformações maiores.

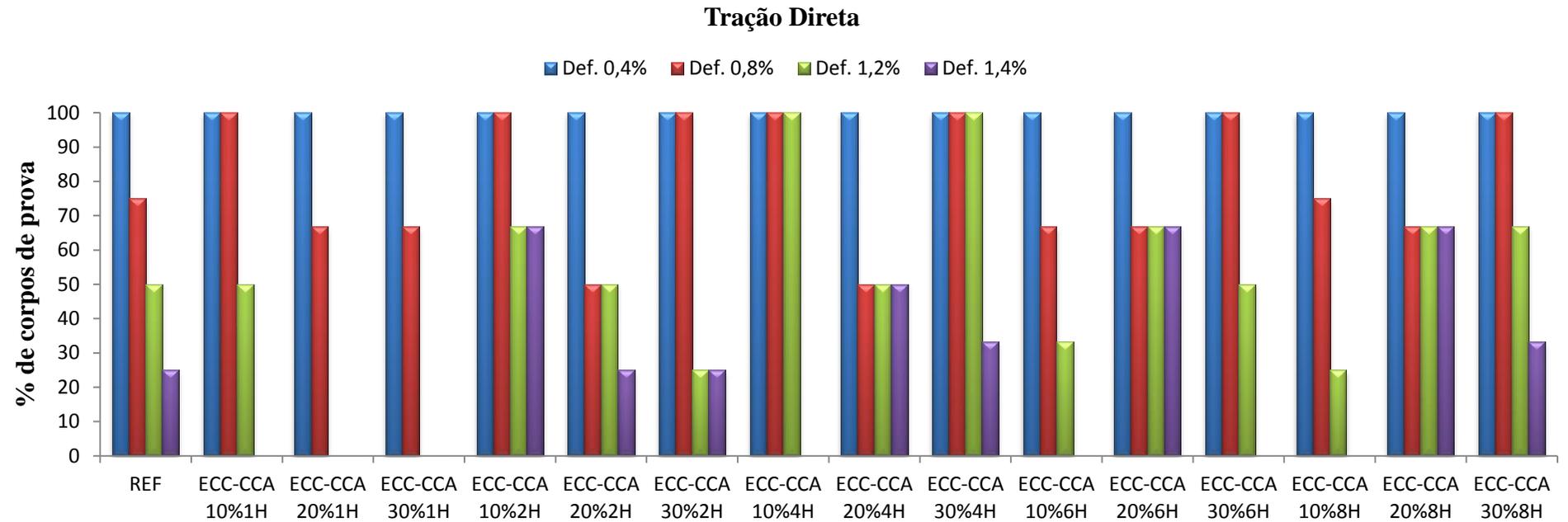


Figura 48 – Indicativo de ductilidade dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no ensaio de tração direta.

A Figura 49 (a) ilustra o gráfico de tensão x deformação do traço referência, a Figura 49 (b) o traço de 30% de CCA moída por 8 horas e a Figura 49 (c) o traço de 30% de CCA moída por 4 horas.

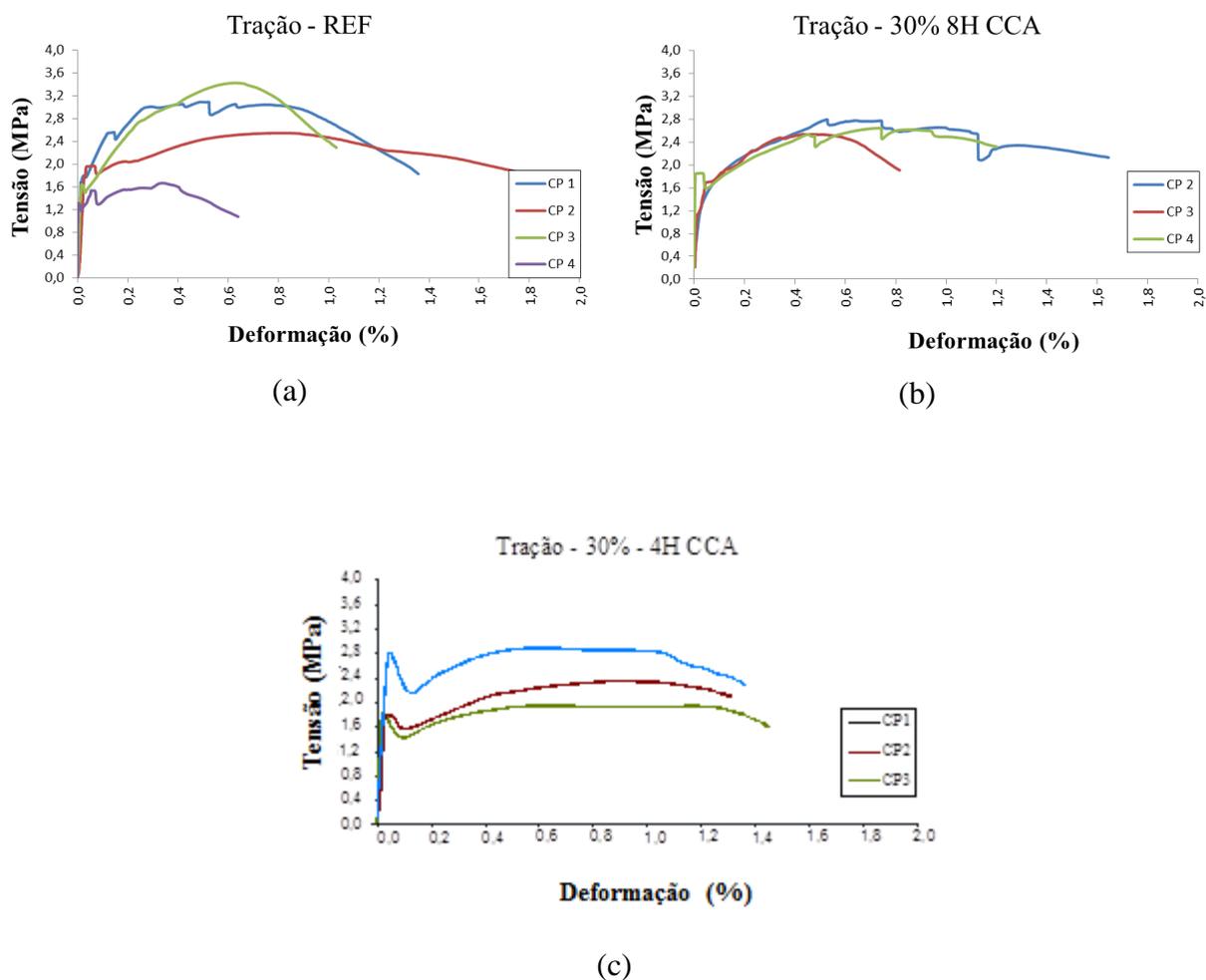


Figura 49 - Curvas tensão x deformação do ensaio de tração direta (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

Estes gráficos ilustram claramente o comportamento *strain-hardening* destes traços. Comparando com o traço referência, pode-se perceber que o traço de 30% CCA moída por 8 horas apresentou um comportamento muito semelhante ao traço referência. Ou seja, percebe-se que as deformações ocorreram com a mesma tensão média do traço referência, sendo elas na média de 8 MPa. Esta mistura também apresenta deformações últimas em torno de 1,4%, superior ao traço de referência. Este traço foi escolhido com o melhor desempenho mecânico dos compósitos utilizados com CCA.

Como já demonstrado anteriormente, o traço com 30% de CCA moída por 4 horas se mostra como uma alternativa viável devido ao bom comportamento mecânico. A porcentagem de 30% favorece muito a diminuição do uso de cimento e a moagem de 4 horas, ao invés de 8 horas, é uma alternativa mais viável ambientalmente devido ao menor consumo de energia para a moagem. O traço com 30% de CCA moída por 8 horas se mostra a melhor das alternativas em termos de desempenho mecânico. Analisando com os resultados encontrados por Garcez (2009), detalhados no item 4.2, nota-se que as deformações encontradas neste estudo são semelhantes às encontradas pela autora, já proporcionando um indicativo que estes resultados possuem coerência com a literatura.

### 6.2.2 Flexão a Quatro Pontos

Para a análise dos resultados obtidos no ensaio de flexão a quatro pontos, foram considerados separadamente os resultados para os deslocamentos obtidos 1) pelo LVDT posicionado na lateral, longitudinalmente ao eixo do corpo de prova (cujo deslocamento foi convertido em deformação) e 2) pelo LVDT posicionado na vertical, perpendicularmente ao eixo do corpo de prova.

A Tabela 24 mostra os resultados obtidos para o ensaio de flexão a quatro pontos considerando o LVDT posicionado na lateral do corpo de prova, analisando as curvas de tensão x deformação para todos os traços estudados na etapa de caracterização mecânica destes compósitos. Cabe lembrar que todos os gráficos de tensão x deformação estão disponíveis no Apêndice B desta dissertação. Para o cálculo do coeficiente de deformação foram adotadas as deformações de 1%, 2%, 3% e 4% e o símbolo (-) caracteriza a perda do corpo de prova para análise.

O traço referência apresentou resultados de tensão de abertura de fissura de 5,5 MPa (média), com tensões máximas em torno de 9 MPa. Em relação ao coeficiente de deformação pode-se perceber que todos os corpos de provas apresentaram comportamento *strain-hardening*, ou seja, os resultados dos coeficientes foram todos acima de 1,0. Ainda em relação ao coeficiente de deformação nota-se que todos os corpos de prova atingiram deformações de 3% e apenas um corpo de prova atingiu a deformação de 4%.

Tabela 24 – Caracterização mecânica – flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na lateral.

Ensaio:		Flexão à Quatro Pontos - Lateral							
Traço	CP	Tensão de Abertura de 1ª Fissura (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Nº de Fissuras	Coefficiente (Deformação 1%)	Coefficiente (Deformação 2%)	Coefficiente (Deformação 3%)	Coefficiente (Deformação 4%)	Comportamento
ECC-Ref	1	6,38	11,49	27	1,45	1,61	1,64	*	Strain-hardening
	2	5,17	7,99	32	1,28	1,38	1,43	1,47	Strain-hardening
	3	5,24	9,06	24	1,27	1,39	1,44	*	Strain-hardening
	4	5,21	7,80	17	1,28	1,38	1,46	1,45	Strain-hardening
ECC-CCA-10%1H	1	6,42	8,22	12	*	*	*	*	Strain-hardening
	2	6,90	8,95	14	2,51	2,77	*	*	Strain-hardening
	3	7,13	9,35	9	1,38	1,27	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%1H	1	5,55	7,78	11	4,26	2,73	*	*	Strain-hardening
	2	1,49	6,98	16	3,34	*	*	*	Strain-hardening
	3	2,45	4,20	9	1,40	*	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-30%1H	1	4,53	7,81	16	1,47	1,65	1,70	*	Strain-hardening
	2	4,99	8,00	13	1,27	1,99	1,47	*	Strain-hardening
	3	4,00	7,27	30	1,54	1,68	3,74	3,25	Strain-hardening
	4	3,61	8,71	15	1,14	1,21	1,23	1,21	Strain-hardening
ECC-CCA-10%2H	1	3,92	6,47	12	3,85	2,71	2,29	*	Strain-hardening
	2	4,40	9,39	17	3,18	2,35	3,63	*	Strain-hardening
	3	4,90	9,77	12	1,09	1,16	1,20	1,22	Strain-hardening
	4	4,74	8,37	10	1,16	*	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-20%2H	1	4,86	9,13	14	6,82	4,27	3,29	*	Strain-hardening
	2	3,24	8,54	9	2,59	*	*	*	Strain-hardening
	3	3,34	7,13	10	1,37	1,32	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-30%2H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	4,76	5,33	7	1,13	2,76	*	*	Strain-hardening
	3	5,85	10,38	16	1,31	1,48	1,57	1,62	Strain-hardening
	4	4,54	7,78	14	1,77	1,72	1,69	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%4H	1	2,33	7,45	13	1,20	1,26	*	*	Strain-hardening
	2	5,76	8,06	13	2,52	*	*	*	Strain-hardening
	3	3,71	9,61	18	1,40	1,30	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%4H	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	2,95	4,97	9	2,91	*	*	*	Strain-hardening
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	3,28	6,80	10	1,30	1,44	1,43	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%4H	1	4,46	5,87	9	9,93	*	*	*	Strain-hardening
	2	5,53	8,60	13	4,92	*	*	*	Strain-hardening
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	6,36	9,06	18	1,59	1,70	1,79	1,65	Strain-hardening
ECC-CCA-10%6H	1	1,73	4,27	14	1,75	1,90	*	*	Strain-hardening
	2	2,57	3,53	8	1,42	1,46	*	*	Strain-hardening
	3	3,07	4,37	11	1,31	*	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%6H	1	3,58	6,82	19	1,40	1,52	*	*	Strain-hardening
	2	4,86	10,87	20	1,35	1,52	*	*	Strain-hardening
	3	4,41	5,64	9	1,76	1,10	1,15	*	Strain-hardening
	4	4,97	7,77	15	1,30	1,43	1,50	1,53	Strain-hardening
ECC-CCA-30%6H	1	3,57	7,03	17	1,53	1,48	*	*	Strain-hardening
	2	2,90	6,30	13	1,50	1,61	1,71	1,79	Strain-hardening
	3	3,41	5,09	7	1,44	1,57	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-10%8H	1	4,71	7,49	18	1,37	1,46	1,45	*	Strain-hardening
	2	4,21	9,01	19	1,21	1,33	1,37	*	Strain-hardening
	3	3,00	7,34	12	1,24	1,34	1,34	1,30	Strain-hardening
	4	3,92	2,85	10	1,28	1,45	1,55	1,61	Strain-hardening
ECC-CCA-20%8H	1	4,77	8,17	23	1,45	1,55	1,57	1,54	Strain-hardening
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	4,86	8,1	17	1,48	1,60	1,64	1,60	Strain-hardening
ECC-CCA-30%8H	1	3,78	8,93	18	1,64	1,79	1,88	1,94	Strain-hardening
	2	4,20	8,40	16	1,38	1,52	1,60	1,66	Strain-hardening
	3	3,68	6,91	14	1,44	1,56	1,60	*	Strain-hardening
	4	3,01	5,15	9	2,76	*	*	*	Strain-hardening

Para a CCA moída por 1 hora, as porcentagens de 10% e 20% obtiveram comportamentos semelhantes em relação ao coeficiente de deformação. Ou seja, para as duas porcentagens as deformações máximas alcançadas foram de 2%. Para a porcentagem de 30% percebe-se que todos os corpos de prova apresentaram comportamento *strain-hardening* e que foi possível determinar o coeficiente para deformações de 4%. Entretanto, cabe lembrar que este traço no ensaio de tração direta apresentou resultados de *strain-softening*, o que revela que este traço precisa ser melhor estudado.

Para a cinza de casca de arroz moída por 2 horas, os resultados indicam que o comportamento *strain-hardening* se desenvolveu, o que indica realmente que no ensaio de tração direta os resultados de *strain-softening* podem ser realmente ruídos experimentais. Para a porcentagem de 10%, a abertura de fissura ocorre em torno de 4,5 MPa, com tensões máximas de 8,5 MPa. Em relação ao coeficiente de deformação, pode-se perceber nas primeiras deformações que o valor do coeficiente é mais alto e à medida que se aumenta as deformações este coeficiente diminui, demonstrando que o comportamento *strain-hardening* para esta CCA se desenvolve melhor com baixas deformações. A porcentagem de 20% segue a mesma tendência da porcentagem de 10%, ou seja, em relação ao coeficiente de deformação seu valor diminui conforme se aumentam as deformações. A porcentagem de 20% apresentou tensão máxima de 8 MPa e abertura de fissuras em torno de 3,8 MPa. A porcentagem de 30% apresenta uma leve tendência de que à medida que se aumentam as deformações, ocorre um aumento do coeficiente de deformação.

Na CCA moída por 4 horas nota-se a tendência de que à medida que se aumentou o teor de substituição (10%, 20% e 30%) aumentou-se também o coeficiente de deformação, já indicando que porcentagens maiores de CCA, o comportamento *strain-hardening* se desenvolve com mais facilidade. Para a porcentagem de 10%, a abertura de fissuras ocorreu em média com tensões de 3,9 MPa e tensões máximas de 8,4 MPa. Para o coeficiente de deformação percebe-se que os corpos de prova atingiram no máximo deformações de 2%. Na porcentagem de 20%, a abertura da primeira fissura surgiu com tensões médias de 3,1 MPa e tensões máximas de 5,8 MPa. Devido a problemas na execução do ensaio, esta porcentagem teve apenas dois corpos de prova para sua comparação, e por apresentarem comportamentos diferentes, não foi possível estabelecer um comportamento para este traço. Já para a porcentagem de 30% a tensão da abertura da primeira fissura aconteceu em média aos 5,4 MPa com tensões máximas de 7,8 MPa. Para a deformação de 1% o coeficiente de deformação atingiu um valor de 5,48, superior ao traço referência.

A cinza de casca de arroz moída por 6 horas apresentou um comportamento semelhante ao encontrado pela cinza de casca de arroz moída por 4 horas. Na porcentagem de 10% o coeficiente de deformação se desenvolveu somente até a deformação de 2%. Já para as porcentagens de 20% e 30% nota-se que alguns corpos de prova conseguiram atingir deformações maiores, chegando até 4%, que foi a deformação máxima estudada. Novamente cabe lembrar que esta cinza, nos ensaios de caracterização, indicou que houve ruídos experimentais que podem afetar a caracterização mecânica dos compósitos.

A CCA moída por 8 horas foi a cinza que apresentou resultados mais satisfatórios em relação ao coeficiente de deformação. Nota-se de maneira geral, que todas as porcentagens apresentaram resultados que demonstram que com o aumento das deformações o coeficiente também aumenta, indicando que o comportamento *strain-hardening* se desenvolve em deformações maiores. Esta cinza de casca de arroz, quando inserida aos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, apresentou os melhores resultados mecânicos.

Realizando uma análise qualitativa, a Figura 50 ilustra a porcentagem de corpos de prova que atingiram as deformações de 1%, 2%, 3% e 4% proporcionando assim um indicativo de ductilidade destes compósitos. De maneira geral, pode-se perceber que as deformações iniciais (1% e 2%) foram as que apresentaram maior número de corpos de prova. As deformações de 3% e 4% obtiveram uma menor quantidade de corpos de prova, comportamento semelhante ao encontrado no ensaio de tração direta.

Para o traço de referência é possível perceber que todos os corpos de prova atingiram as deformações de 1%, 2% e 3%, resultados já encontrados pelo coeficiente de deformação, demonstrando que este compósito apresenta grande capacidade de deformação juntamente com o desenvolvimento da múltipla fissuração. O indicativo de ductilidade dos compósitos com CCA moída por 1 hora demonstra que estes compósitos se deformam mais em pequenas deformações, ou seja, nas deformações de 1% e 2%. Para a CCA moída por 2 horas, o indicativo de ductilidade fica mais evidente nas três primeiras deformações estudadas (1%, 2% e 3%). Para a cinza de casca de arroz moída por 4 horas é possível perceber que a medida que se aumenta a porcentagem de substituição (10%, 20% e 30%) aumenta-se o indicativo de ductilidade. Para a porcentagem de 30%, os corpos de prova atingiram todas as deformações estudadas, demonstrando que a porcentagem de 30% desta cinza se torna uma alternativa viável para este tipo de compósito.

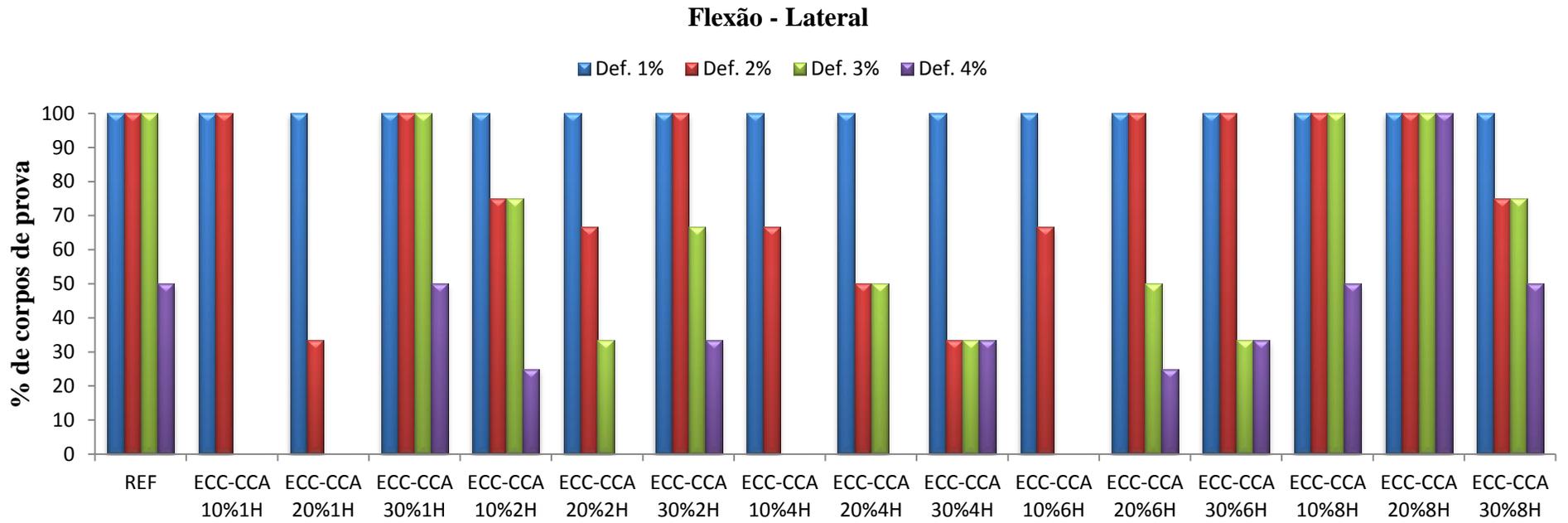


Figura 50 - Indicativo de ductilidade dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no ensaio de flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na lateral do corpo de prova.

Para a CCA moída por 6 horas o indicativo de ductilidade obteve seu maior desempenho nas primeiras deformações (1% e 2%), enquanto que para deformações maiores (3% e 4%) obteve uma perda de desempenho. As porcentagens de 20% e 30% apresentaram melhores resultados, atingindo todas as deformações mesmo que com uma % porcentagem baixa de corpos de prova.

A cinza de casca de arroz moída por 8 horas é a melhor alternativa para este tipo de compósito, pois é possível perceber que todas as porcentagens apresentaram resultados superiores ao traço referência. Na busca pela maior quantidade de substituição de cimento por CCA nestes compósitos, a porcentagem de 30% se torna uma alternativa mais interessante.

A Figura 51 ilustra a curva tensão x deformação do (a) traço referência, (b) traço de 30% CCA moída por 8 horas e (c) traço de 30% moída por 4 horas.

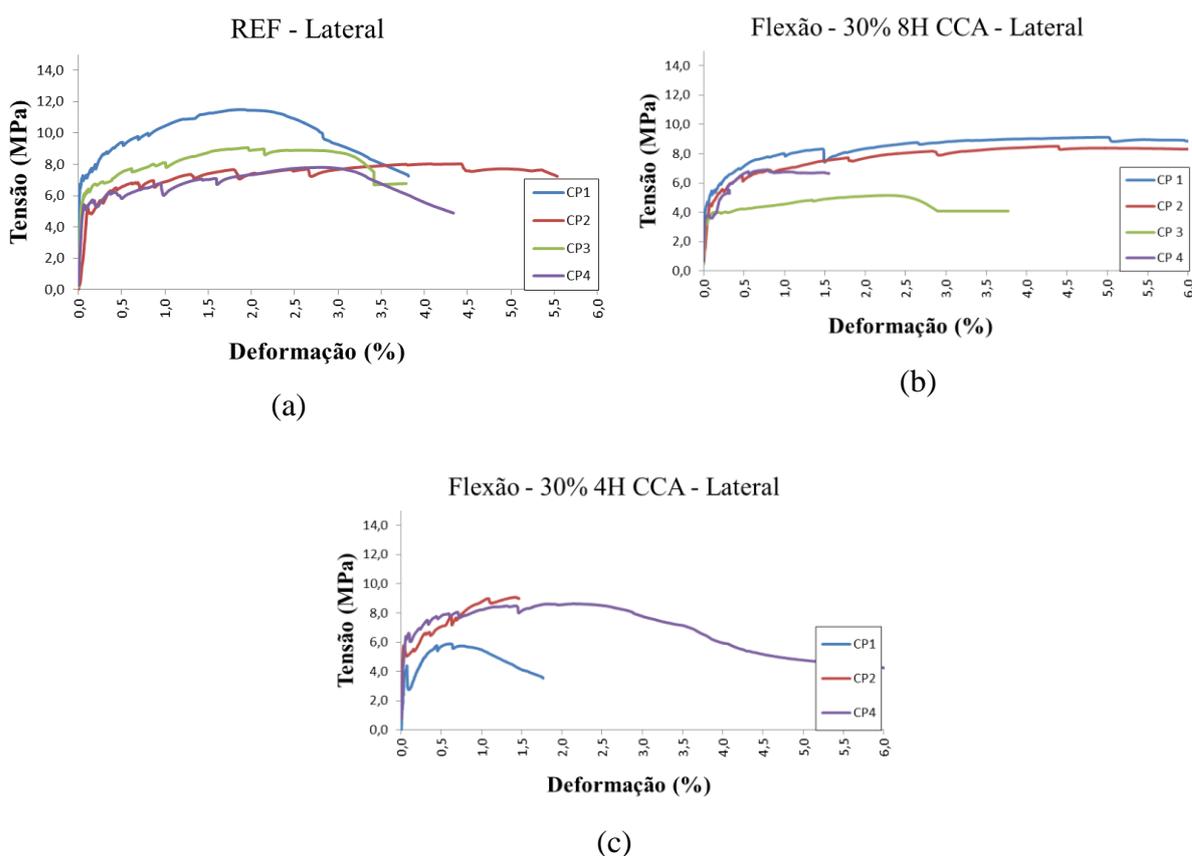


Figura 51 - Curva tensão x deformação do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na lateral (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

Analisando o traço 30% de CCA moída por 8 horas (Figura 51 (b)) com o traço referência (Figura 51 (a)) é possível notar que o traço com CCA possui tensões máximas muito semelhante ao traço de referência, em torno de 8 MPa, e que o comportamento *strain-*

*hardening* fica muito evidente neste traço. O processo de costura gerado pelas fibras permitiu que o comportamento de múltipla fissuração se desenvolvesse.

A CCA moída por 4 horas (Figura 51 (c)) apresentou um comportamento um pouco inferior aos demais traços. Após o aparecimento da primeira fissura, o processo de múltipla fissuração ficou bem evidente em todos os corpos de prova. A porcentagem de 30% favorece a diminuição do uso de cimento e a moagem de 4 horas se torna mais viável em comparação a 8 horas devido ao menor consumo de energia para a moagem.

Buscando um melhor entendimento do comportamento destes compósitos, para o ensaio de flexão a quatro pontos também foi avaliada a flecha destes compósitos, obtida pelo LVDT posicionado na vertical, perpendicular ao eixo do corpo de prova. A Tabela 25 mostra os resultados da caracterização mecânica destes compósitos considerando a flecha dos corpos de prova. Os gráficos de tensão x deslocamento encontram-se no Apêndice C desta dissertação. Para avaliar o coeficiente da flecha foram adotados os deslocamentos de 2 mm, 4 mm, 6 mm e 8 mm.

Para o traço referência nota-se que a medida que se aumenta os deslocamentos há um aumento dos valores do coeficiente da flecha, demonstrando a existência nítida do comportamento *strain-hardening*.

A cinza de casca de arroz moída por 1 hora novamente apresenta o comportamento *strain-hardening* bem evidente, como já foi analisado na deformação lateral destes compósitos. É possível perceber que os corpos de prova atingem deslocamentos máximos de 4 mm. A porcentagem de 20% apresentou comportamento muito semelhante à porcentagem de 10%, uma vez que o coeficiente também chegou ao deslocamento máximo de 4 mm. Para a porcentagem de 30% o coeficiente se desenvolve ao deslocamento máximo de 6 mm.

Para a CCA moída por 2 horas nota-se que a porcentagem de 10% atingiu o deslocamento máximo estudado (8 mm) e as porcentagens de 20% e 30% atingiram apenas o deslocamento máximo de 4 mm. Ao analisarmos com os resultados encontrados na deformação lateral nota-se que o coeficiente da flecha foi menor que o coeficiente de deformação. Acredita-se que isto se deve a curvatura que os compósitos apresentam durante o ensaio, ocasionando um deslizamento do LVDT durante a execução do ensaio.

Tabela 25 - Caracterização mecânica – flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na vertical (flecha).

Ensaio:		Flexão à Quatro Pontos - Flecha					
Traço	CP	Nº de Fissuras	Coefficiente (Deslocamento 2mm)	Coefficiente (Deslocamento 4mm)	Coefficiente (Deslocamento 6mm)	Coefficiente (Deslocamento 8mm)	Comportamento
ECC-Ref	1	19	1,31	1,49	1,59	*	Strain-hardening
	2	21	1,23	1,32	1,36	2,70	Strain-hardening
	3	20	1,20	1,34	1,44	*	Strain-hardening
	4	9	1,09	1,17	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%1H	1	14	1,16	3,01	*	*	Strain-hardening
	2	16	1,20	1,27	*	*	Strain-hardening
	3	11	1,37	2,19	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%1H	1	13	1,22	3,03	*	*	Strain-hardening
	2	12	1,04	1,02	*	*	Strain-hardening
	3	8	1,37	*	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-30%1H	1	29	1,13	12,25	8,31	*	Strain-hardening
	2	16	1,25	1,43	*	*	Strain-hardening
	3	27	2,08	2,64	3,98	*	Strain-hardening
	4	14	1,36	1,47	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%2H	1	13	3,74	2,54	*	*	Strain-hardening
	2	16	1,44	1,63	1,77	3,68	Strain-hardening
	3	9	1,35	1,56	1,39	1,35	Strain-hardening
	4	9	2,10	1,88	1,81	*	Strain-hardening
ECC-CCA-20%2H	1	13	1,57	3,70	*	*	Strain-hardening
	2	14	1,58	1,85	*	*	Strain-hardening
	3	9	1,19	*	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-30%2H	1	14	1,29	4,83	*	*	Strain-hardening
	2	8	0,98	*	*	*	Strain-softening
	3	19	1,41	1,59	*	*	Strain-hardening
	4	17	2,33	1,96	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%4H	1	11	1,17	1,27	*	*	Strain-hardening
	2	7	1,06	1,03	*	*	Strain-hardening
	3	-	-	-	-	-	-
	4	14	1,65	1,83	1,73	*	Strain-hardening
ECC-CCA-20%4H	1	8	1,43	1,63	*	*	Strain-hardening
	2	-	-	-	-	-	-
	3	12	1,49	1,61	1,65	*	Strain-hardening
	4	7	1,38	1,50	1,56	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%4H	1	7	3,57	*	*	*	Strain-hardening
	2	16	1,28	1,45	*	*	Strain-hardening
	3	9	1,11	1,10	*	*	Strain-hardening
	4	24	1,78	1,53	1,47	1,44	Strain-hardening
ECC-CCA-10%6H	1	12	1,60	5,56	*	*	Strain-hardening
	2	10	1,83	2,20	2,25	*	Strain-hardening
	3	7	3,68	2,59	*	*	Strain-hardening
	4	-	-	-	-	-	-
ECC-CCA-20%6H	1	18	1,42	11,02	*	*	Strain-hardening
	2	20	1,33	1,62	1,82	*	Strain-hardening
	3	8	1,04	1,12	*	*	Strain-hardening
	4	18	2,62	2,00	1,84	1,75	Strain-hardening
ECC-CCA-30%6H	1	19	1,38	1,60	8,63	*	Strain-hardening
	2	14	1,60	1,82	1,93	*	Strain-hardening
	3	14	1,34	1,45	*	*	Strain-hardening
	4	18	5,06	3,13	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-10%8H	1	18	1,16	5,61	*	*	Strain-hardening
	2	12	1,13	1,21	1,28	1,29	Strain-hardening
	3	27	1,38	1,55	1,64	1,66	Strain-hardening
	4	10	4,10	3,01	*	*	Strain-hardening
ECC-CCA-20%8H	1	-	-	-	-	-	-
	2	17	1,06	1,20	1,27	*	Strain-hardening
	3	10	1,27	*	*	*	Strain-hardening
	4	17	1,36	1,53	1,59	*	Strain-hardening
ECC-CCA-30%8H	1	32	1,78	10,23	7,65	6,38	Strain-hardening
	2	22	1,33	1,49	1,59	1,65	Strain-hardening
	3	13	1,11	1,21	1,29	1,18	Strain-hardening
	4	10	2,00	1,62	*	*	Strain-hardening

Para a cinza de casca de arroz moída por 4 horas, o coeficiente encontrado para os resultados de flecha destes compósitos segue o mesmo comportamento encontrado para a análise do coeficiente de deformação, ou seja, conforme aumenta o teor de substituição (10%, 20% e 30%) aumenta-se o coeficiente com deslocamentos maiores. Para as porcentagens de 10% e 20% o comportamento *strain-hardening* se desenvolve em deslocamentos de até 6 mm. E para a porcentagem de 30% nota-se que o coeficiente chega ao deslocamento máximo estudado (8 mm)

A CCA moída por 6 horas também segue o mesmo comportamento encontrado na deformação lateral destes compósitos. Para todas as porcentagens existe uma tendência do valor do coeficiente da flecha aumentar conforme aumenta-se os deslocamentos, caracterizando que o comportamento *strain-hardening* se desenvolve também em deslocamentos maiores.

Os resultados encontrados na avaliação da flecha dos compósitos com cinza de casca de arroz moída por 8 horas seguem o mesmo comportamento dos resultados da deformação lateral, com exceção da porcentagem de 20%. Ou seja, os resultados demonstram que com o aumento dos deslocamentos o coeficiente também aumenta, indicando que o comportamento *strain-hardening* se desenvolve com deslocamentos de flecha maiores.

O indicativo de ductilidade também foi utilizado para a avaliação da flecha destes compósitos. Com isso novamente foram avaliados os deslocamentos de 2 mm, 4 mm, 6 mm, e 8 mm. A Figura 52 apresenta a porcentagem de corpos de prova que atingiu os deslocamentos adotados. De maneira geral, assim como foi encontrado no ensaio de tração direta, e avaliando a deformação lateral destes compósitos no ensaio de flexão a quatro pontos, o indicativo de ductilidade se mostra mais evidente nos primeiros deslocamentos (2 mm e 4 mm).

Para o traço referência é possível notar que o indicativo de ductilidade mostra que nos deslocamentos iniciais adotados a múltipla fissuração fica mais evidente e a medida que se aumenta os deslocamento têm-se uma perda de desempenho destes compósitos. Este comportamento foi observado anteriormente na caracterização mecânica do ensaio de tração direta deste compósito de referência.

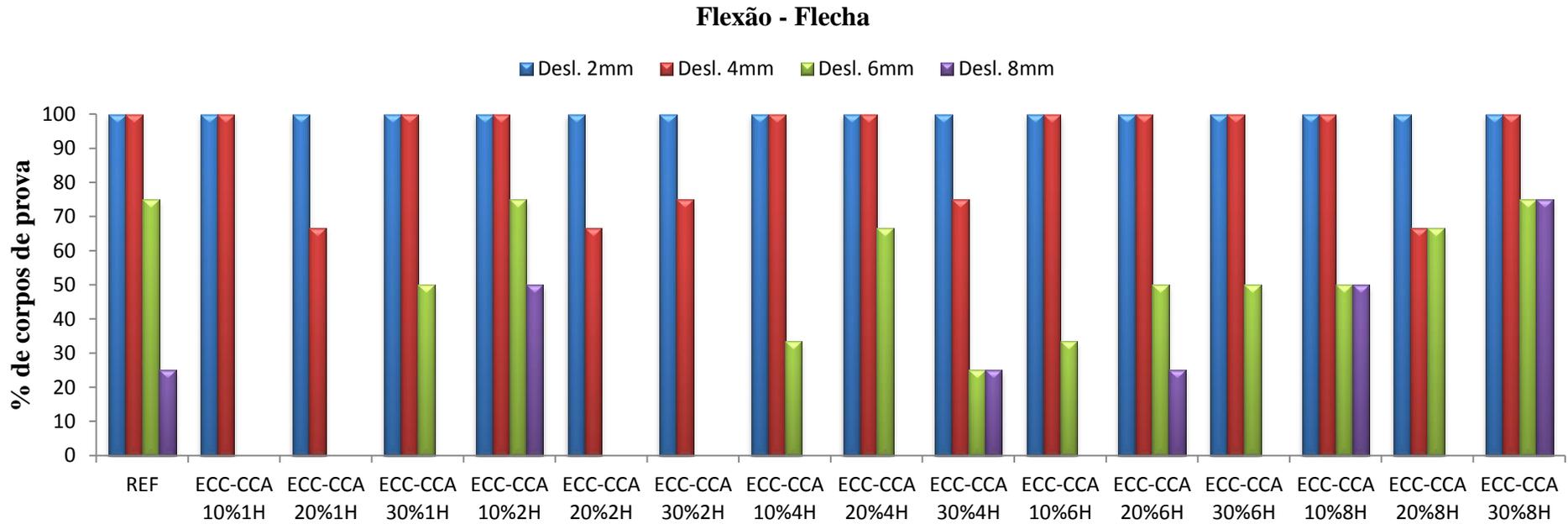


Figura 52 - Indicativo de ductilidade dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação no ensaio de flexão a quatro pontos – LVDT posicionado na vertical para medição da flecha.

As cinzas de casca de arroz moídas por 1 e 2 horas têm o mesmo comportamento em relação ao indicativo de ductilidade, ou seja, este indicativo é mais evidente nos deslocamentos iniciais (2 mm e 4 mm), e perde desempenho em deslocamentos maiores. Este indicativo de ductilidade tende a mostrar que a múltipla fissuração destes compósitos em deslocamentos maiores acaba ficando comprometida.

Com relação à CCA moída por 4 horas, nota-se uma melhora no desempenho dos corpos de prova em relação ao indicativo de ductilidade obtido considerando a deformação lateral dos mesmos (Figura 50). Para as porcentagens de 10% e 20% nota-se que após o deslocamento de 4 mm tem-se um perda de desempenho. A porcentagem de 30% atingiu todos os deslocamentos adotados para esta análise, demonstrando que a múltipla fissuração consegue se desenvolver com deslocamentos maiores.

As porcentagens de 10%, 20% e 30% da CCA moída por 6 horas apresentaram resultados muitos semelhantes entre elas. É novamente importante mencionar que devido a ruídos experimentais estes resultados não podem ser confirmados, apenas dando um indicativo da possível potencialidade do uso desta CCA nestes compósitos.

Novamente é possível perceber que a CCA moída por 8 horas demonstrou resultados mais satisfatórios entre todas as CCA estudadas. O grande destaque é para a porcentagem de 30% que obteve resultados superiores ao traço referência, indicando que esta CCA tem melhor potencial para ser usada nos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.

A Figura 53 ilustra os gráficos de tensão x deslocamento encontrados para os resultados da flecha. A Figura 53 (a) mostra o traço referência, a Figura 53 (b) o traço 30% CCA moída por 8 horas e a Figura 53 (c) o traço 30% CCA moída por 4 horas.

Analisando a Figura 53 (b), percebe-se que o traço de CCA 30% moída por 8 horas apresentou um comportamento de múltipla fissuração bem evidente. Percebe-se um aumento da múltipla fissuração em relação ao traço referência e também é notável que os corpos de prova com CCA não apresentaram uma perda de desempenho durante a execução do ensaio como é visto no traço referência após o aparecimento da última fissura.

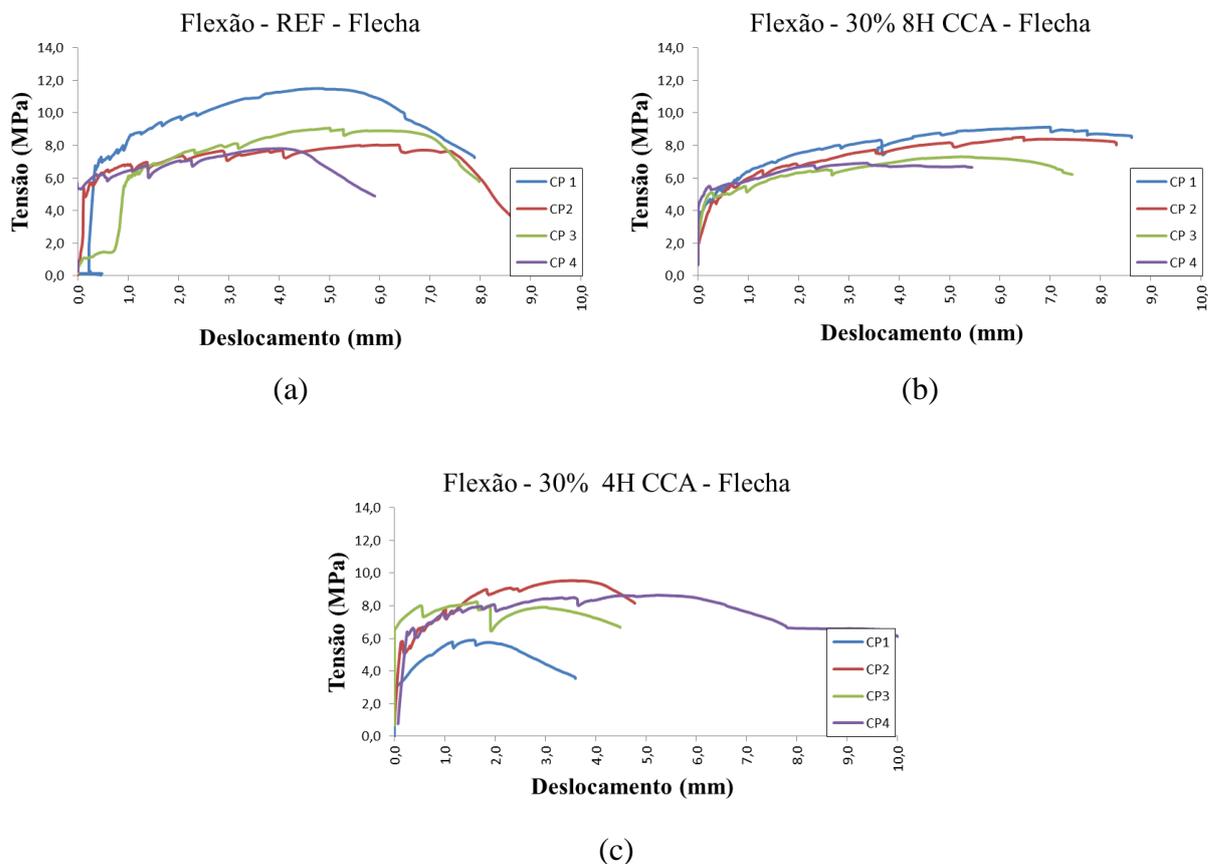


Figura 53 – Curva tensão x deslocamento do ensaio de flexão a quatro pontos com LVDT posicionado na vertical (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

Para a CCA moída por 4 horas (Figura 53 (c)) o processo de múltipla fissuração fica evidente após o aparecimento da primeira fissura, caracterizando também o comportamento *strain-hardening*. Comparando com o traço referência nota-se que ambos tiveram comportamentos semelhantes, apenas com um diferencial que os compósitos com CCA moída por 4 horas obtiveram deslocamentos menores em relação ao traço referência. Este traço foi escolhido para ser estudado nos ensaios complementares na busca pela utilização de uma CCA que exija um menor consumo de energia para a moagem.

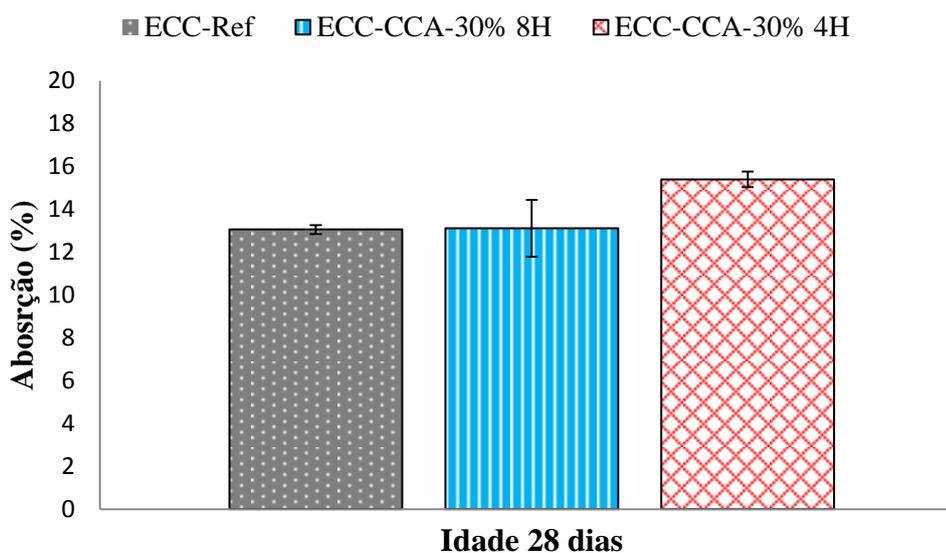
## 6.3 ENSAIOS COMPLEMENTARES

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios complementares desta dissertação. Ressaltando que nesta fase da dissertação são apresentados apenas os traços escolhidos na fase da caracterização mecânica dos compósitos por apresentarem os resultados mais satisfatórios, ou seja, o traço referência, o traço 30% de CCA moída por 8 horas e o traço 30% de CCA moída por 4 horas.

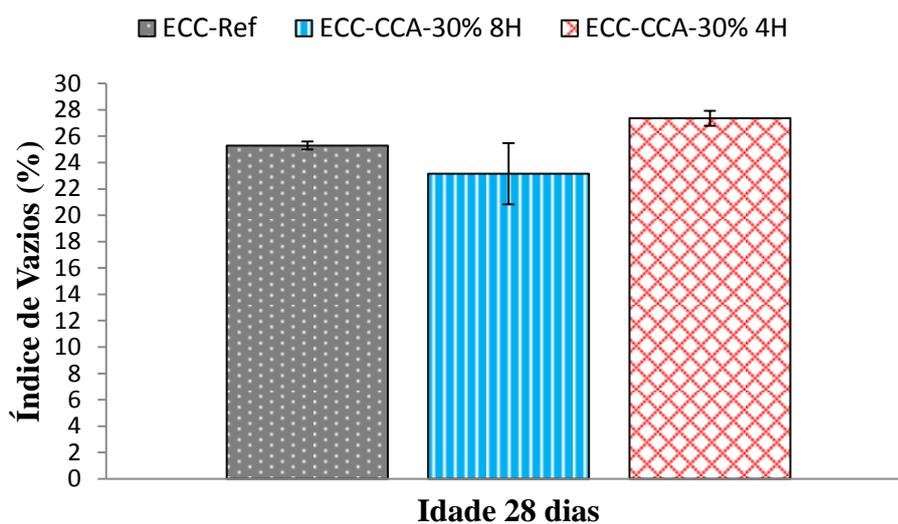
### 6.3.1 Absorção e Índice de Vazios

A Figura 54 (a) e (b) apresenta os resultados médios de três determinações da absorção de água e de índice de vazios, respectivamente, para cada traço estudado. Analisando a Figura 54 (a) o compósito com cinza de casca de arroz moída por 8 horas apresentou uma absorção semelhante ao traço referência. O estudo da absorção e índice de vazios destes compósitos iniciou como um indicativo da durabilidade destes compósitos, pelo fato de ser o primeiro trabalho realizado com cinza de casca de arroz em ECC. Pereira da Costa (2015) desenvolveu estudo paralelo a este em sua dissertação, com foco na durabilidade destes compósitos. A autora realizou este mesmo ensaio e comprovou que não há diferença significativa dos resultados entre 28 dias e 91 dias para a cinza de casca de arroz moída por 8 horas, assim indicando que esta cinza de casca de arroz tem uma pozolanicidade alta ocorrendo já aos 28 dias de idade e que não ocorrerá um aumento da absorção com idades mais avançadas.

Para a cinza de casca de arroz moída por 4 horas percebe-se um aumento da absorção em relação aos demais traços estudados. Acredita-se que este comportamento tenha ocorrido devido a esta cinza apresentar um diâmetro médio de partícula maior que a da cinza de casca de arroz moída por 8 horas, diminuindo o empacotamento dos materiais da mistura. No item 6.1.6 desta dissertação, os resultados demonstraram que a CCA moída por 4 horas apresentou diâmetro médio de 7,29  $\mu\text{m}$ , enquanto a CCA moída por 8 horas obteve um diâmetro médio de 3,59  $\mu\text{m}$ , ou seja, 49% maior, com isso favorecendo que a matriz cimentícia seja mais porosa e conseqüentemente apresente uma maior absorção.



(a)



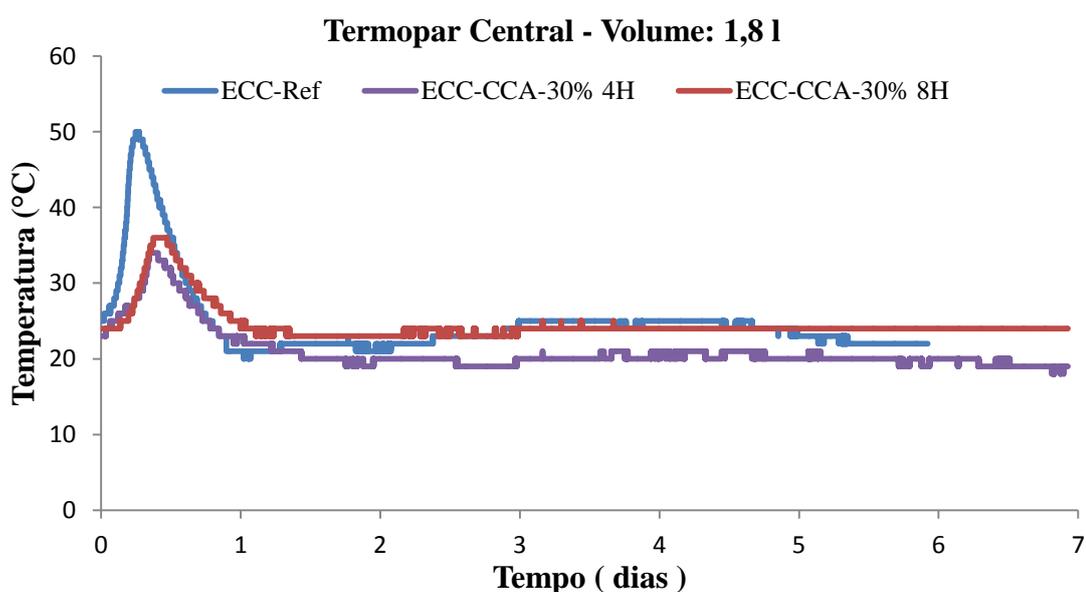
(b)

Figura 54- (a) Absorção (b) Índice de vazios.

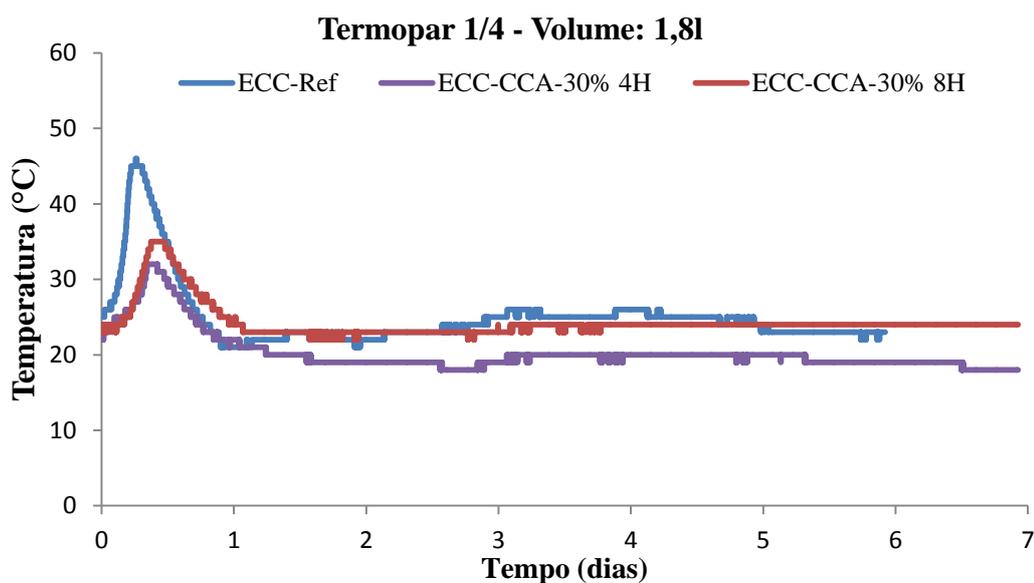
Quanto à Figura 54 (b), verifica-se o mesmo comportamento com relação ao ensaio de absorção para a cinza de casca de arroz moída por 4 horas, ou seja, novamente este traço obteve um índice de vazios maior que os demais traços estudados. Para a cinza de casca de arroz moída por 8 horas observa-se uma tendência de menor índice de vazios que o traço referência, isto acontece provavelmente devido ao refinamento dos poros da mistura com CCA, pelo fato da cinza ter um diâmetro de partícula menor, ocasionando uma matriz cimentícia mais compacta.

### 6.3.2 Curva de Liberação de Calor de Hidratação

A Figura 55 representa os dois termopares posicionados na fôrma com 100% de seu volume preenchido. A Figura 55 (a) representa o termopar posicionado no centro do volume e a Figura 55 (b) representa o termopar a  $\frac{1}{4}$  da fôrma. Para a avaliação da curva de liberação de calor de hidratação percebe-se um comportamento muito semelhante ao encontrado por Alves (2002), ou seja, conforme se utiliza pozolanas, a cinética de hidratação é mais lenta.



(a)



(b)

Figura 55 - Curva de Liberação de Calor de Hidratação – (a) Termopar no centro no volume de 1,8 litros (b) Termopar na extremidade no volume de 1,8 litros.

Considerando as Figura 55 (a) e (b), é possível perceber que a liberação de calor varia muito pouco conforme a posição do termopar. Para o traço referência é possível perceber que este compósito é o que apresenta maior liberação de calor nas primeiras 24 horas de hidratação.

Para os compósitos com cinza de casca de arroz é possível perceber que as duas misturas com CCA (4 horas e 8 horas) apresentaram curvas de hidratação mais suaves e com um pico de calor máximo menos acentuado que o traço referência. Pode se perceber também que com o aumento dos dias de ensaio, a liberação de calor se torna mais suave em todos compósitos. Avaliando-se os compósitos com CCA, percebe-se que houve uma diminuição da liberação de calor, que pode ser provavelmente explicada pelo fato da reação pozolânica da CCA ser mais lenta.

A Figura 56 demonstra os resultados do termopar posicionado no centro do volume de 50% da fôrma. Avaliando a diferença de volume, entre a Figura 55 (a) e Figura 56, é possível verificar que o volume influencia diretamente na liberação de calor dos compósitos, pois quanto menor é o volume, menor é a quantidade de calor liberada, o que já era esperado.

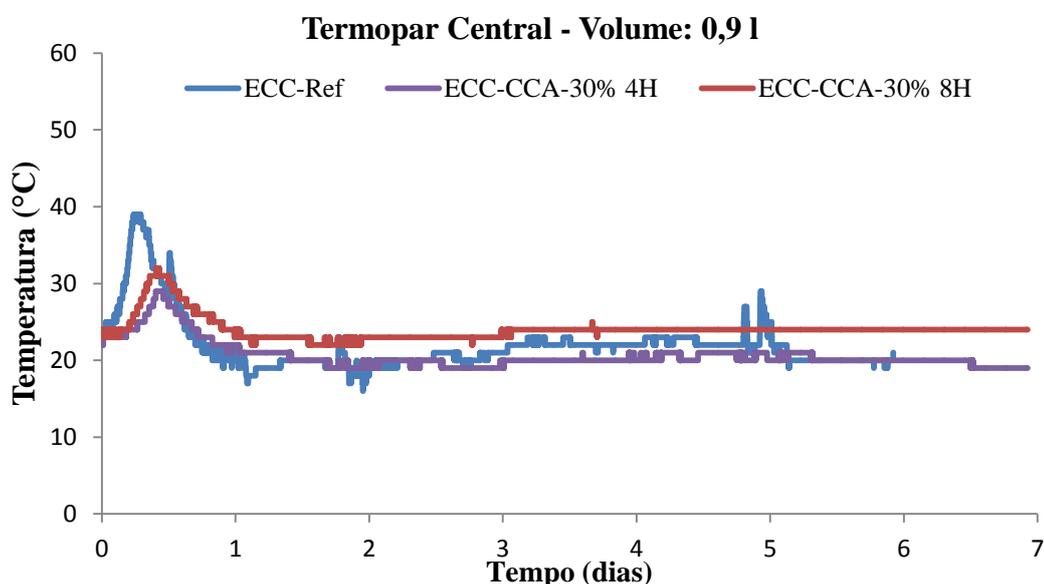


Figura 56 - Curva de Liberação de Calor de Hidratação – Termopar Central Volume 0,91 litros.

Para fôrma com preenchimento de 50% de seu volume (Figura 56), os resultados apresentados seguem a mesma tendência da fôrma com 100% de seu preenchimento, ou seja, a porcentagem de 30% de substituição de cimento por CCA começa a diminuir a cinética de

hidratação comparado ao traço referência, apresentando os picos de hidratações menores e uma liberação de calor mais gradativa com o passar dos dias de ensaio.

A Figura 57 ilustra as temperaturas máximas atingidas nas primeiras 24 horas do ensaio. Para o compósito de referência nota-se apenas uma diferença de 5°C entre os dois termopares que estavam no mesmo volume de compósito, ou seja, pode-se dizer que a posição dos termopares não tem influência significativa na variação da temperatura para as condições de ensaio adotadas. Entretanto, quando comparado o volume de 100% da fôrma com o de 50%, o volume de material tem influência em sua liberação de calor de hidratação.

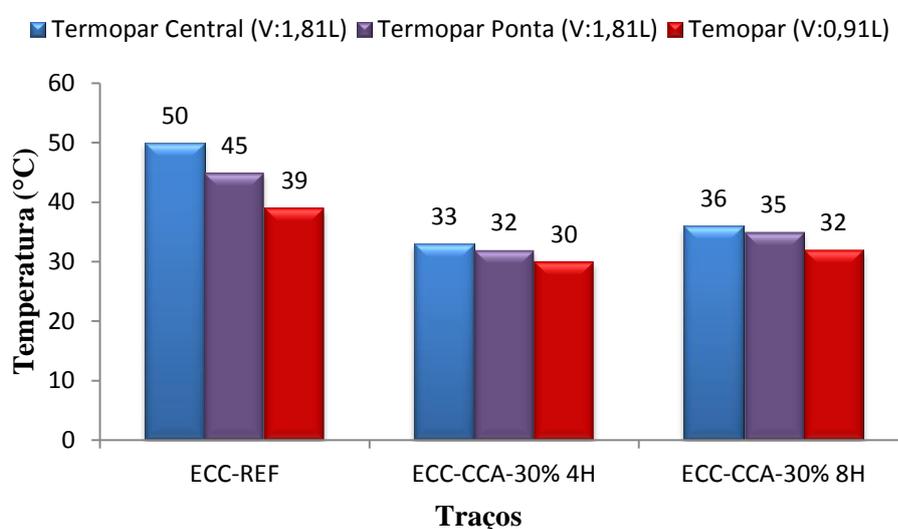


Figura 57 - Temperatura máxima encontrada no ensaio de Liberação de Calor de Hidratação.

Para os compósitos com CCA (Figura 57), tanto o moído por 4 horas, quanto o moído por 8 horas, a variação entre o volume de compósito não causou uma diferença significativa devido à reação pozolânica ocorrer em idades mais avançadas e não nas primeiras 24 horas. Isto provavelmente contribuiu para uma menor liberação de calor de hidratação e contribuiu para a redução de fissuras de retração autógenas.

### 6.3.3 Aderência pelo Método de Arrancamento

O compósito cimentício de elevada capacidade de deformação é um material que vem sendo estudado recentemente. Com o intuito de entender um pouco mais o seu comportamento e investigar a aderência deste compósito com concreto convencional, visando a utilização deste compósito como material de reparo, esta dissertação propôs realizar o ensaio de aderência

pelo método de arrancamento seguindo os preceitos da Norma NBR 13528 (ABNT, 2010): Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da aderência à tração.

Sabe-se que esta norma é realizada para revestimentos de argamassas, mas na busca pelo entendimento da aderência do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com concreto convencional e também por não se ter estudos que indiquem qual a aderência entre esses dois materiais, foi adotado este método de ensaio como um primeiro indicativo de aderência.

Durante a execução do ensaio em várias tentativas percebeu-se que a ruptura de arrancamento ocorria na interface do compósito com a resina epóxi, sem realizar o arrancamento do compósito da base de concreto. A Figura 58 (a) mostra o equipamento posicionado para o ensaio de arrancamento e a Figura 58 (b) ilustra uma dessas tentativas de realização do ensaio, onde a ruptura ocorreu na interface da resina epóxi com o compósito.



(a)



(b)

Figura 58 - Ensaio de Aderência por Arrancamento (a) Ensaio em execução e (b) Ruptura de arrancamento na interface resina/compósito.

Percebeu se que a superfície do compósito possuía irregularidades devido à presença das fibras, criando uma superfície com pontos fracos na aderência entre a resina e o compósito. Na tentativa de criar uma ponte de aderência mais resistente entre os materiais foi realizado

um lixamento com uma esmerilhadeira no compósito cimentício, conforme ilustra a Figura 59. Após o lixamento, o compósito cimentício apresentou uma superfície regular e foi então realizada uma nova colagem dos pinos de arrancamento e realizado o ensaio novamente.



Figura 59 - Lixamento do compósito no intuito de regularizar a superfície.

Mesmo após o tratamento da superfície, muitos pinos foram arrancados na interface da resina epóxi com o ECC. No corpo de prova com espessura de compósito de 2 cm, foi possível realizar o arrancamento de apenas um pino, conforme a Figura 60 (a). Já no corpo de prova com altura de 3 cm de compósito, novamente em apenas um pino foi possível realizar o arrancamento, como ilustra a Figura 60 (b). Para os corpos de prova com altura de compósito de 5 cm não foi possível realizar o ensaio de arrancamento devido à dificuldade de realizar o corte do compósito até o substrato de concreto.



(a)



(b)

Figura 60 - Arrancamento na interface compósito/concreto (a) Compósito 2 cm (b) Compósito 3 cm.

Para a altura de compósito com 2 cm a resistência de ruptura foi de 1,85 MPa, com uma profundidade de ruptura de 2,5 cm, ou seja, a ruptura ocorreu no concreto, fato que pode ser comprovado na Figura 60 (a). No compósito com altura de 3 cm a resistência de ruptura foi de

2,4 MPa e a profundidade de ruptura com 3,4 cm, ou seja, com a ruptura novamente ocorrendo no concreto. Esta profundidade de ruptura também pode ser vista na Figura 60 (b).

A norma NBR: 13749 (ABNT, 2013): Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação, especifica limites de aderência à tração para revestimentos, conforme a Tabela 26.

Tabela 26 - Limites estabelecidos pela NBR 13749.

Local	Acabamento	RA (MPa)	
Parede	Interna	Pintura ou Base para reboco	$\geq 0,20$
		Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
	Externa	Pintura ou Base para reboco	$\geq 0,30$
		Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto		$\geq 0,20$	

Como este ensaio é realizado em revestimentos argamassados nota-se que as resistências de ruptura normalmente encontradas é de 0,30 MPa, valor muito inferior ao encontrado com os compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, assim confirmando que este tipo de ensaio não se enquadra para caracterizar a aderência entre compósitos e concretos.

#### 6.3.4 Aderência pelo Método de Cisalhamento

Outro método utilizado para compreender a aderência entre o compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com substrato de concreto foi o de aderência pelo método de cisalhamento oblíquo. Este ensaio seguiu os preceitos da norma americana ASTM C882: *Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear* com algumas adaptações, pois para este ensaio não foi utilizada nenhuma ponte de aderência como resina entre os substratos. A escolha por não utilizar nenhuma resina foi primeiramente para conhecer a aderência que os compósitos podem desenvolver em substratos de concreto. E o segundo motivo por não utilizar resina foi devido ao potencial uso destes compósitos como reparo, ou seja, a utilização de uma resina poderia encarecer ainda mais o uso deste compósito para este propósito.

Primeiramente, para compreender melhor a aderência entre compósito-concreto foi realizada uma análise da resistência à compressão destes compósitos. A Figura 61 ilustra os resultados de resistência à compressão para os compósitos estudados nesta fase da dissertação.

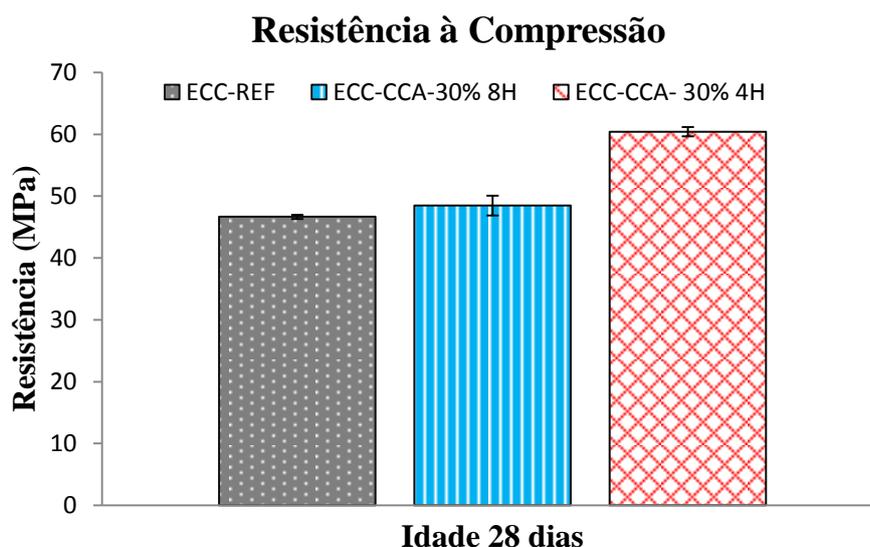


Figura 61 - Resistência à compressão dos compósitos.

Para o compósito referência nota-se que sua resistência à compressão máxima foi de 45 MPa. Para o compósito com 30% de CCA moída por 8 horas é possível perceber um pequeno aumento da resistência em relação ao traço referência, com resistência em torno de 48 MPa. Já o compósito com 30% de CCA moída por 4 horas foi o que apresentou melhores resultados em comparação com todos os traços estudados. Acredita-se que este aumento da resistência em comparação com a CCA moída por 4 horas se deve a sua atividade pozolânica, lembrando que esta CCA obteve maior índice de desempenho em comparação com todas as CCAs estudadas, que pode ser observado no item 6.1.4. Além disso, a utilização da CCA moída por 8 horas pode contribuir para um melhor refinamento da matriz cimentícia devido ao menor tamanho das partículas da CCA em comparação com as partículas de cimento, aumentando assim a resistência à compressão.

A Figura 62 ilustra os resultados dos corpos de provas mistos (compósito-concreto) com relação a resistência à compressão. Nos resultados da união compósito referência com concreto pode ser observado que a resistência deste elemento foi de aproximadamente 55 MPa. Ou seja, percebe-se um aumento da resistência quando comparado ao resultado encontrado para o compósito (Figura 61) que foi de 45 MPa. Foi utilizado um concreto para aplicação em pavimentos como substrato para os ensaios de aderência, que possui resistência à compressão de aproximadamente 70 MPa conforme Pereira da Costa (2015).

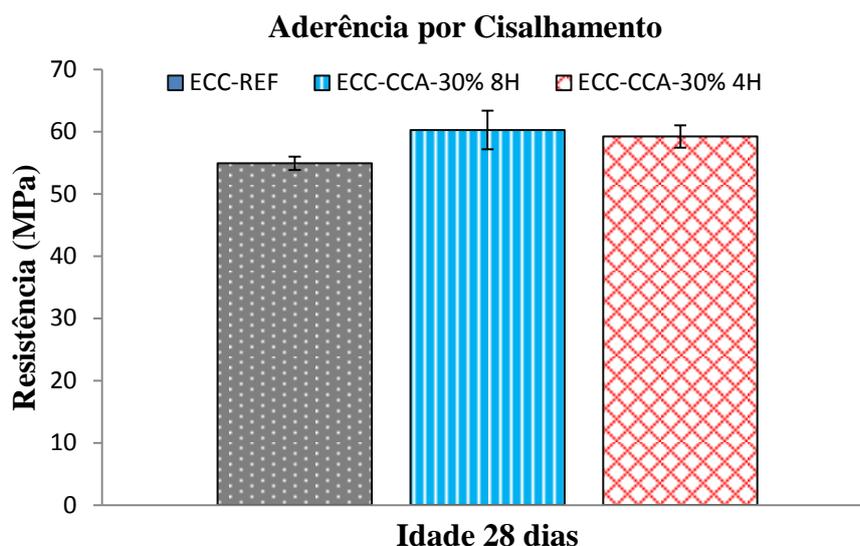


Figura 62 - Aderência pelo método de cisalhamento oblíquo.

O elemento misto de compósito com 30% de CCA moída por 8 horas e concreto foi o que apresentou melhor desempenho em relação à aderência entre compósito-concreto. A resistência obtida para este traço foi em torno de 60 MPa, resultado superior ao encontrado para a resistência à compressão deste compósito como corpo de prova único. Este incremento na resistência será explicado por meio do mapeamento de fissuras que será explicado na sequência.

Avaliando os resultados para o elemento misto entre compósito com 30% CCA moída por 4 horas e concreto nota-se que se obteve uma resistência de 59 MPa, resultado muito semelhante ao encontrado por elementos únicos de compósito com esta mesma CCA.

Com o intuito de analisar a propagação das fissuras desenvolvidas pelo processo de compressão nos corpos de prova de aderência por cisalhamento oblíquo, foi realizado um mapeamento destas fissuras. O mapeamento foi realizado considerando a transformação da superfície circular do corpo de prova em uma superfície plana. Sabe-se que para este ensaio foi utilizado um total de 5 corpos de prova para cada traço estudado, entretanto essa análise foi realizada em apenas um corpo de prova para cada traço.

A Figura 63 ilustra o mapeamento de fissuras para o elemento misto entre compósito de referência com o concreto. Avaliando a propagação de fissuras neste elemento misto é possível notar que as fissuras se propagam apenas no compósito e na união entre eles com

uma abertura de fissuras de no máximo de 0,05 mm. Este comportamento explica os resultados encontrados na Figura 62, que o incremento da resistência no elemento misto em comparação com a resistência do compósito se deve à elevada resistência à compressão do concreto, pelo fato de não ter sido danificado. A Figura 64 ilustra os corpos de provas de compósito-REF/concreto rompidos após a realização do ensaio de compressão.

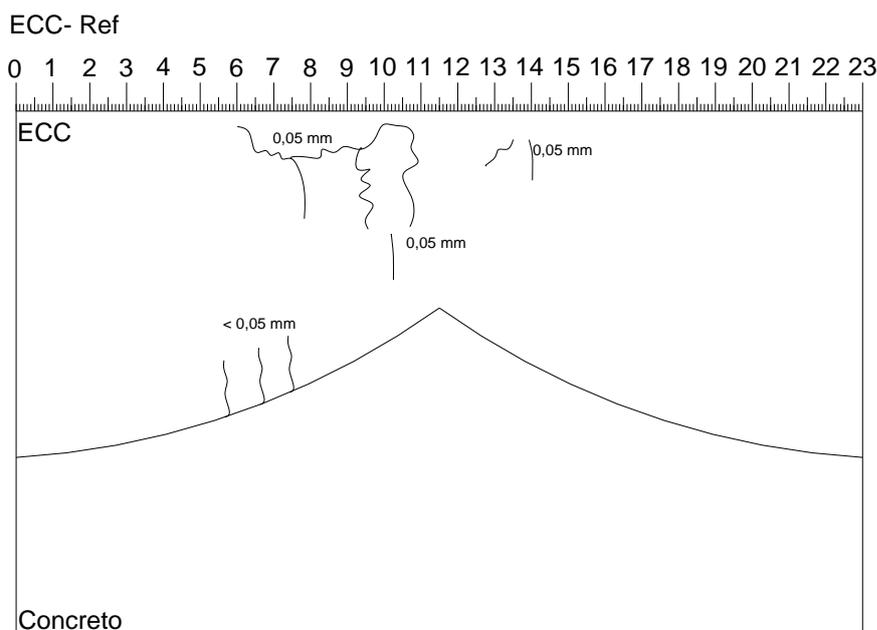


Figura 63 - Mapeamento de fissura do elemento misto: compósito referência/concreto.



Figura 64 - Corpos de prova rompidos - compósito-REF/concreto.

O mapeamento de fissuras do elemento misto entre compósito com 30% de CCA moída por 8 horas e o concreto é ilustrado na Figura 65. Nota-se que as fissuras se propagam entre os dois elementos e que a abertura das fissuras aumenta conforme existe a mudança de materiais no corpo de prova (aberturas de fissuras menores no compósito e maiores no concreto). Por meio

desta figura é possível compreender o aumento da resistência observado na Figura 62, ou seja, a propagação de fissuras indica que existe uma boa aderência entre os dois materiais utilizados. Outro detalhe importante de mencionar é que para este ensaio foi realizado um corte no corpo de prova com uma serra, o que deixa uma superfície de contato muito mais lisa do que em uma situação real de recapeamento de concretos. Ou seja, a tendência é que na situação real a aderência talvez seja ainda maior. A Figura 66 ilustra os corpos de provas de compósito-30%8h/concreto, rompidos após a realização do ensaio de compressão.

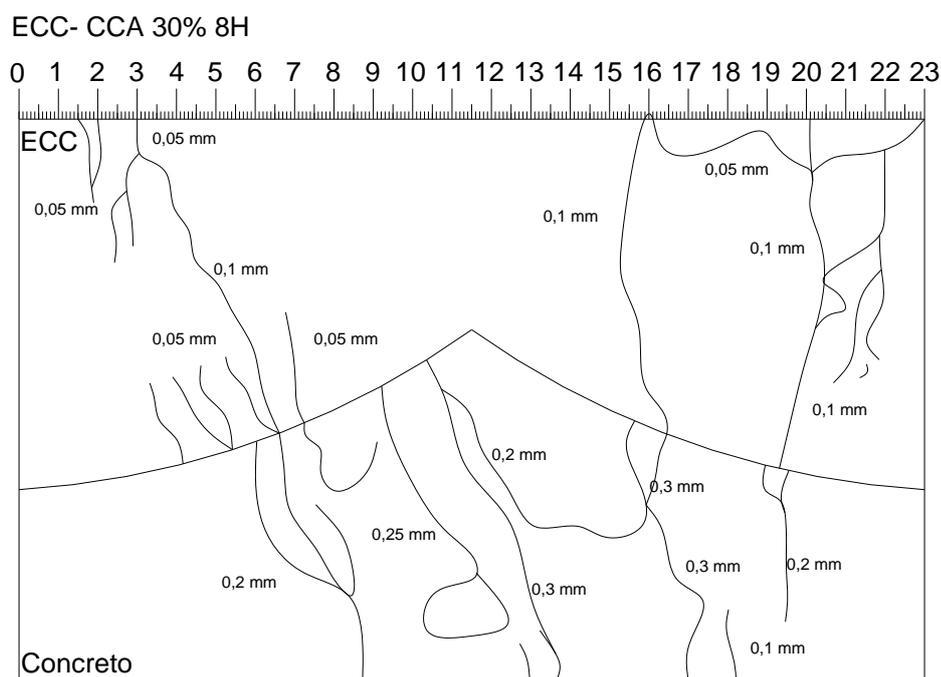


Figura 65 - Mapeamento de fissuras do elemento misto: compósito com 30% de CCA 8h/concreto.



Figura 66 - Corpos de prova rompidos - compósito-30%8h/concreto.

A Figura 67 ilustra o mapeamento de fissuras do elemento misto de compósito com 30% de CCA moída por 4 horas e concreto. A propagação de fissuras deste corpo de prova se repete como para o corpo de prova com CCA moída por 8 horas, ou seja, as fissuras se propagam de um material para o outro. Pode ser observado que existe menos fissuras do que em relação ao compósito com CCA moída por 8 horas e que as fissuras se propagam mais no concreto. A abertura das fissuras também aumenta no concreto em comparação com as fissuras no compósito. A abertura de fissuras menor no compósito se deve à utilização de fibras que proporciona uma menor abertura às fissuras. A Figura 68 ilustra os corpos de provas de compósito-30%4h/concreto, rompidos após a realização do ensaio de compressão.

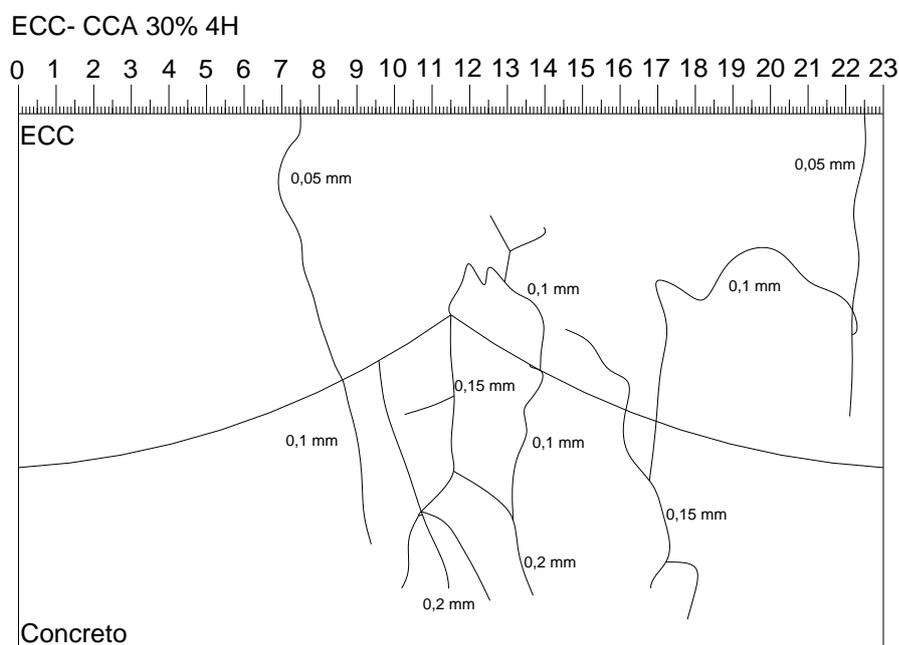


Figura 67 - Mapeamento de fissuras do elemento misto: compósito com 30% de CCA 4h/concreto.



Figura 68 - Corpos de prova rompidos - compósito-30%4h/concreto.

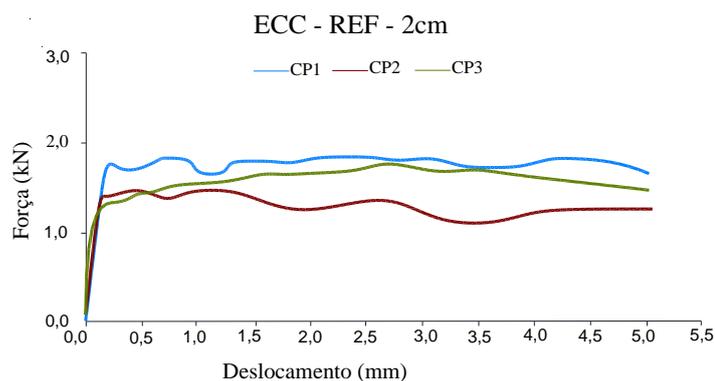
De maneira geral, pode-se perceber que as duas cinzas de casca de arroz estudadas melhoraram a ponte de aderência entre compósito e concreto com relação ao compósito de referência. Este ensaio proporciona um indicativo de aderência destes compósitos como possível material de reparo, indicando que não há necessidade de um terceiro material, como resinas, por exemplo, para a união do compósito com o concreto.

### 6.3.5 Reflexão de Fissuras

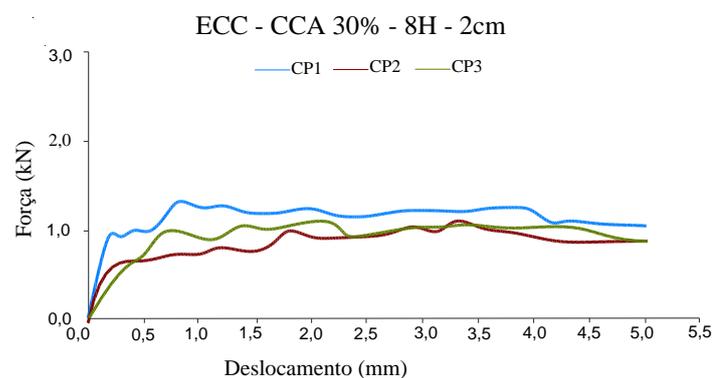
Para o ensaio de reflexão de fissuras foram adotadas três alturas (2 cm, 3cm e 4 cm) de compósitos sobreposto a um substrato de concreto. Para este ensaio, da mesma maneira que o ensaio de aderência pelo método do cisalhamento, não foi adotado nenhum tipo de tratamento superficial na interface compósito-concreto. Cabe lembrar que o LVDT usado no ensaio possuía curso máximo de 5 mm, com isso os resultados foram obtidos até a esse deslocamento. Na Figura 69 são apresentados os resultados da utilização do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com altura de cobrimento de 2 cm. A Figura 69 (a) ilustra os resultados encontrados com compósito de referência, a Figura 69 (b) ilustra os resultados para o compósito com 30% CCA moída 8 horas e a Figura 69 (c) para o compósito com 30% CCA moída por 4 horas.

Para o compósito de referência nota-se que carga máxima alcançada foi de aproximadamente 1,5 kN e que a abertura da primeira fissura ocorre com uma força de 1,0 kN. O processo de múltipla fissuração se torna visível, indicando que o processo de *strain-hardening* se desenvolve em elementos mistos. Para o compósito com 30% de substituição de cimento por CCA moída por 8 horas percebe-se que a carga máxima atingida foi de 1,0 kN, um pouco abaixo do compósito de referência. Para este compósito também é notado que o processo múltipla fissuração se desenvolve com abertura da primeira fissura em torno de 0,5 kN.

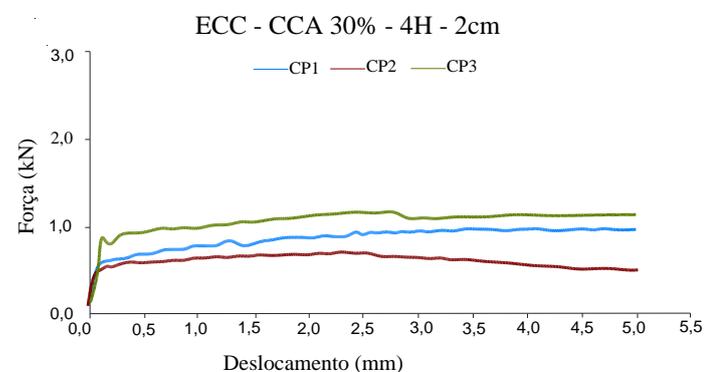
Avaliando o compósito cimentício com 30% de cinza de casca de arroz moída por 4 horas nota-se que o mesmo obteve um comportamento muito semelhante em relação ao compósito com CCA moída por 8 horas. A carga máxima atingida para estes compósitos também foi de 1,0 kN. Com a utilização da CCA moída por 4 horas, o processo de múltipla fissuração se torna mais suave do que em relação aos outros compósitos estudados.



(a)



(b)



(c)

Figura 69 - Reflexão de fissuras: compósito com altura de 2 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

A Figura 70 ilustra um dos corpos de prova após o ensaio de flexão à quatro pontos. Observa-se que próximo à região da fissura existente no concreto ocorra a formação de múltiplas fissuras. Pelo fato desta região ser a de maior interesse neste estudo, ela será utilizada para fins de comparação entre as vigas mistas estudadas.

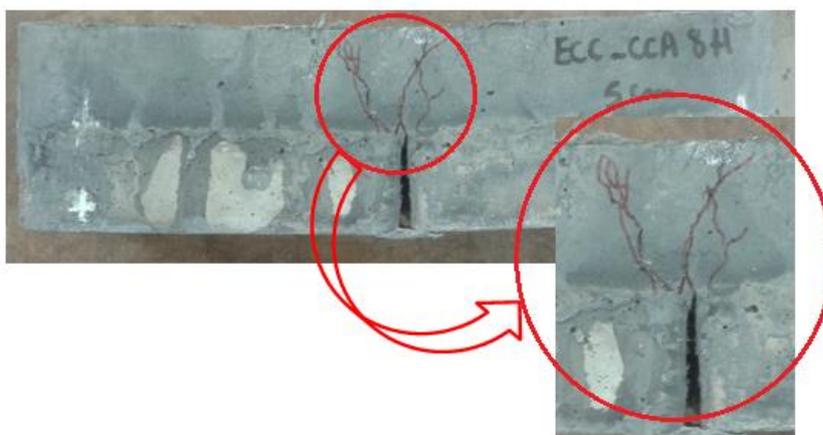


Figura 70 – Corpo de prova fissurado após ter sido submetido ao ensaio de flexão a quatro pontos.

Para efeito de comparação a Figura 71 (a) ilustra uma viga com compósito de referência, a Figura 71 (b) com compósito com 30% CCA moída por 8 horas e Figura 71 (c) com compósito com 30% de CCA moída por 4 horas, todos os compósitos com altura de cobrimento de 2 cm.



(a)



(b)



(c)

Figura 71 - Fissuração na região da junta existente no concreto da viga composta por compósito/concreto com altura de 2 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

A Figura 71 (a) mostra o padrão de fissuração encontrado no compósito de referência. Nota-se que aparecem várias fissuras e que estas fissuras se propagam ao longo da altura do compósito, chegando à superfície. Em relação à aderência entre estas duas matérias é possível observar que não há o deslocamento entre eles, apenas é observado que a junta já existente no concreto apresentou uma abertura maior após o ensaio, o que era esperado.

Para o compósito com 30% de CCA moída por 8 horas (Figura 71 (b)) pode ser observado que também há múltiplas fissuras nesta região e que estas fissuras se propagam até a metade do compósito com CCA. Este comportamento é muito semelhante ao compósito com 30% de CCA moída por 4 horas (Figura 71 (c)) onde as fissuras não se propagam para a superfície do compósito. Para as duas cinzas estudadas, nota-se que não há o deslocamento entre compósito-concreto, fato que comprova os resultados de aderência encontrados nesta dissertação.

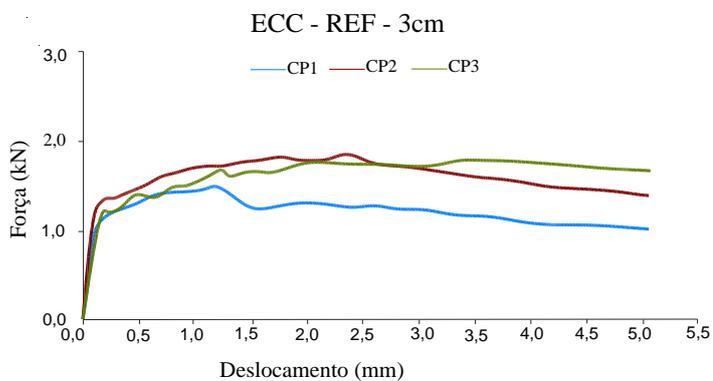
Para a altura de recobrimento de 3 cm, a Figura 72 (a) (b) (c) ilustra os resultados encontrados pelo compósito de referência, pelo compósito com 30% CCA moída por 8 horas e pelo compósito com 30% CCA moída por 4 horas, respectivamente.

De maneira geral, a altura de 3 cm de compósito apresentou resultados com maiores cargas do que em relação a altura de 2 cm para os compósitos com CCA, que era esperado. Em relação ao compósito de referência, pode ser observado que todos os corpos de prova apresentaram resultados semelhantes entre si, ou seja, a carga máxima atingida foi de aproximadamente de 1,5 kN, mesmo resultado encontrado para a altura de 2 cm. É possível perceber a múltipla fissuração nestes corpos de prova com deslocamentos menores, ou seja, à medida que o deslocamento aumenta a formação de novas fissuras diminui.

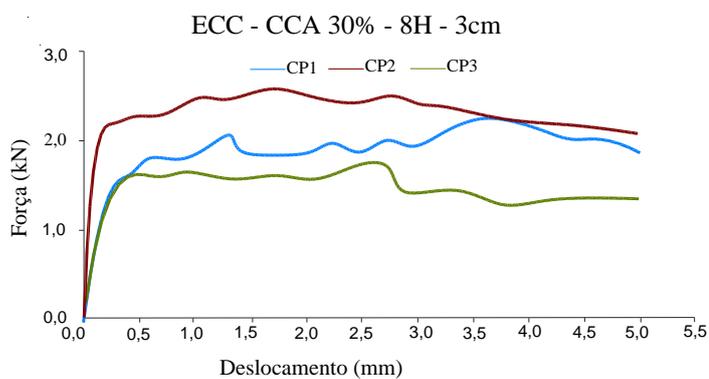
Para o compósito com 30% de cinza de casca de arroz moída por 8 horas, percebe-se um ganho de desempenho com o aumento de 1 cm de altura. A carga máxima atingida com esta cinza de casca de arroz foi de aproximadamente de 2,0 kN, um ganho de 50% com o aumento de 1 cm de altura. Para esta altura de compósito percebe-se que a múltipla fissuração se desenvolve, caracterizando o comportamento *strain-hardening* para estes compostos.

Com a cinza de casca de arroz moída por 4 horas percebe-se o mesmo ganho em relação ao compósito com cinza de casca de arroz moída por 8 horas. O aumento de 1 cm de altura proporcionou uma melhora de ganhos de carga máxima que foi de aproximadamente de 1,8 kN. Assim como para a CCA moída por 8 horas, a CCA moída por 4 horas apresentou

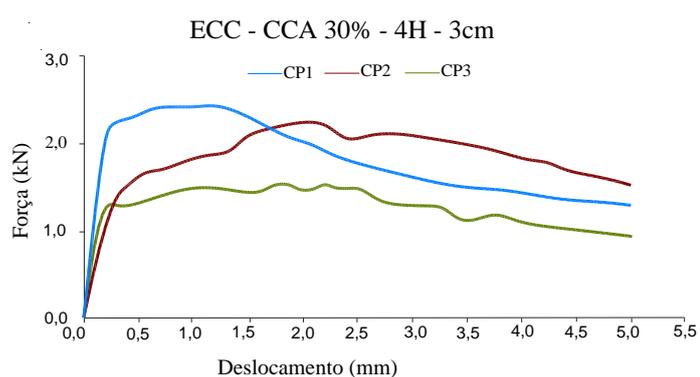
múltipla fissuração bem evidente e com o aumento dos deslocamentos é notado uma leve tendência de perda de desempenho destes compósitos cimentícios.



(a)



(b)



(c)

Figura 72 – Reflexão de fissuras: compósito com altura de 3 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

A Figura 73 ilustra o padrão de fissuração encontrado para os compósitos com altura de recobrimento de 3 cm. A Figura 73 (a) ilustra o compósito de referência, a Figura 73 (b) o

compósito com 30% de CCA moída por 8 horas e a Figura 73 (c) o compósito com 30% de CCA moída por 4 horas.

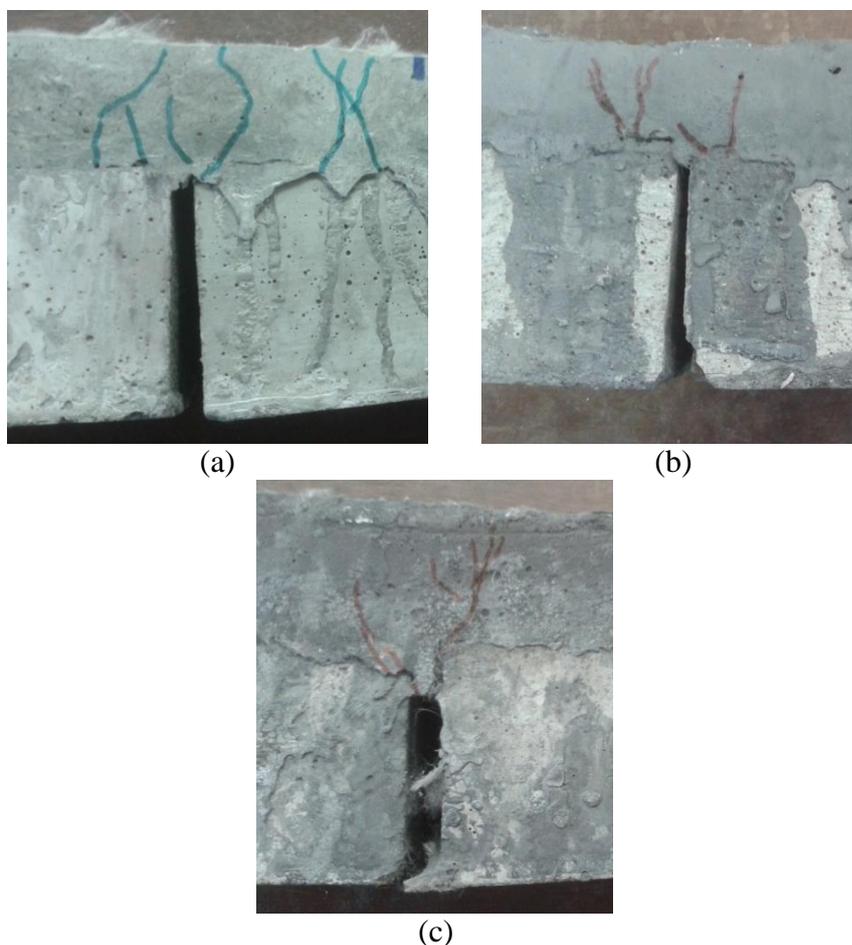


Figura 73 – Fissuração na região da junta existente no concreto da viga composta por compósito/concreto com altura de 3 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

Para o compósito de referência com a altura de 3 cm percebe-se que as fissuras se concentram na região da junta existente no concreto, mas também há o aparecimento de fissuras mais espaçadas na viga. Novamente as fissuras se propagam até a altura do compósito e a junta existente apresentou um alargamento na sua abertura após o ensaio ter sido executado. Para esta altura de 3 cm também não há o deslocamento dos elementos, indicando que o corpo de prova foi submetido aos esforços como elemento único.

O compósito com cinza de casca de arroz moída por 8 horas com altura de 3 cm apresentou uma suave abertura de fissuras visíveis, fissuras estas que se propagam até a metade do compósito. A junta existente no concreto não apresentou um alargamento na sua abertura e a aderência entre compósito-concreto não foi afetada. O compósito com CCA moída por 4

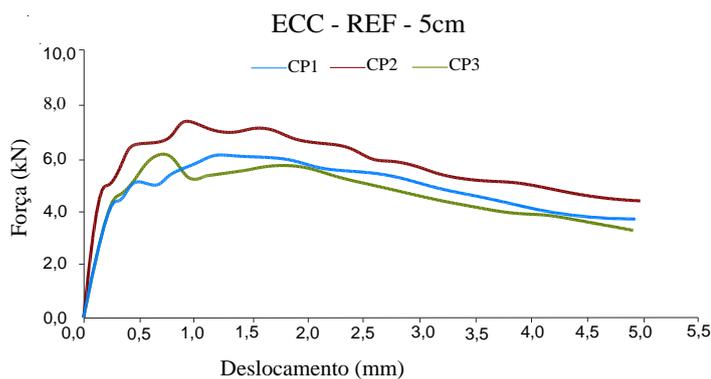
horas obteve um comportamento semelhante ao encontrado pela cinza de casca de arroz moída por 8 horas, com exceção que a junta existente no concreto obteve um alargamento de sua abertura, resultante do ensaio de flexão a quatro pontos que foi submetido.

Para a altura de recobrimento de 5 cm, a Figura 74 (a) (b) (c) ilustra os resultados encontrados pelo compósito de referência, pelo compósito com 30% CCA moída por 8 horas e pelo compósito com 30% CCA moída por 4 horas, respectivamente. Todas as vigas com a altura de 5 cm apresentaram um ganho de desempenho em relação às demais alturas estudadas.

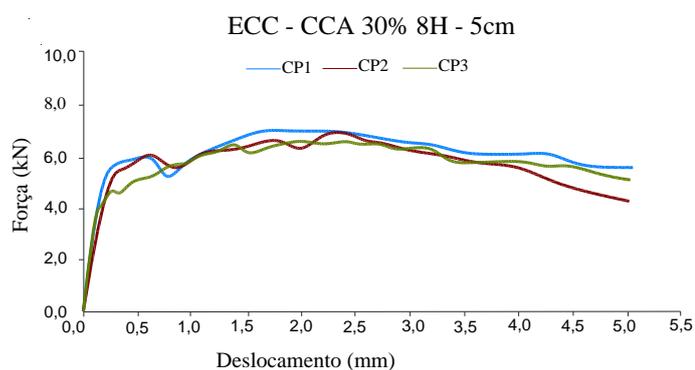
Para o compósito de referência a carga máxima atingida por estes corpos de prova foi de 6,0 kN em média. Nota-se que a múltipla fissuração se desenvolve com melhor desempenho para os menores deslocamentos. A partir do deslocamento de 3,0 mm existe uma perda de desempenho no desenvolvimento do comportamento *strain-hardening*.

Com a cinza de casca de arroz moída por 8 horas a carga máxima atingida também foi de 6,0 kN, resultado semelhante ao encontrado ao compósito de referência. Nota-se que a múltipla fissuração parece mais evidente em relação ao compósito referência, sem perda de desempenho observado. A abertura da primeira fissura ocorre com cargas de 4,0 kN. Após a abertura da primeira fissura, percebe-se que o comportamento *strain-hardening* se desenvolve no corpo de prova.

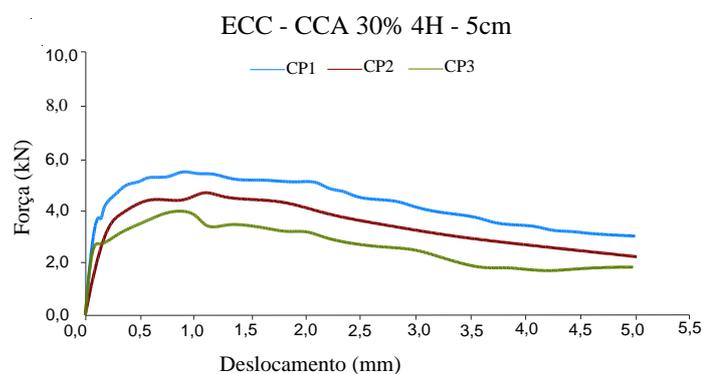
Para os compósitos com cinza de casca de arroz moída por 4 horas é observada uma perda de desempenho em relação aos demais traços. A carga máxima encontrada para estes compósitos com CCA moída por 4 horas foi de 4,0 kN. A múltipla fissuração para este traço se desenvolve com curvas mais suaves e observa-se que a partir do deslocamento de 2,5 mm existe uma perda de desempenho.



(a)



(b)



(c)

Figura 74 - Reflexão de fissuras: compósito com altura de 5 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

Para fins de comparação, a Figura 75 (a) ilustra uma viga com compósito de referência, a Figura 75 (b) com compósito com 30% CCA moída por 8 horas e a Figura 75 (c) com compósito com 30% de CCA moída por 4 horas, todos os compósitos com altura de cobertura de 5 cm.

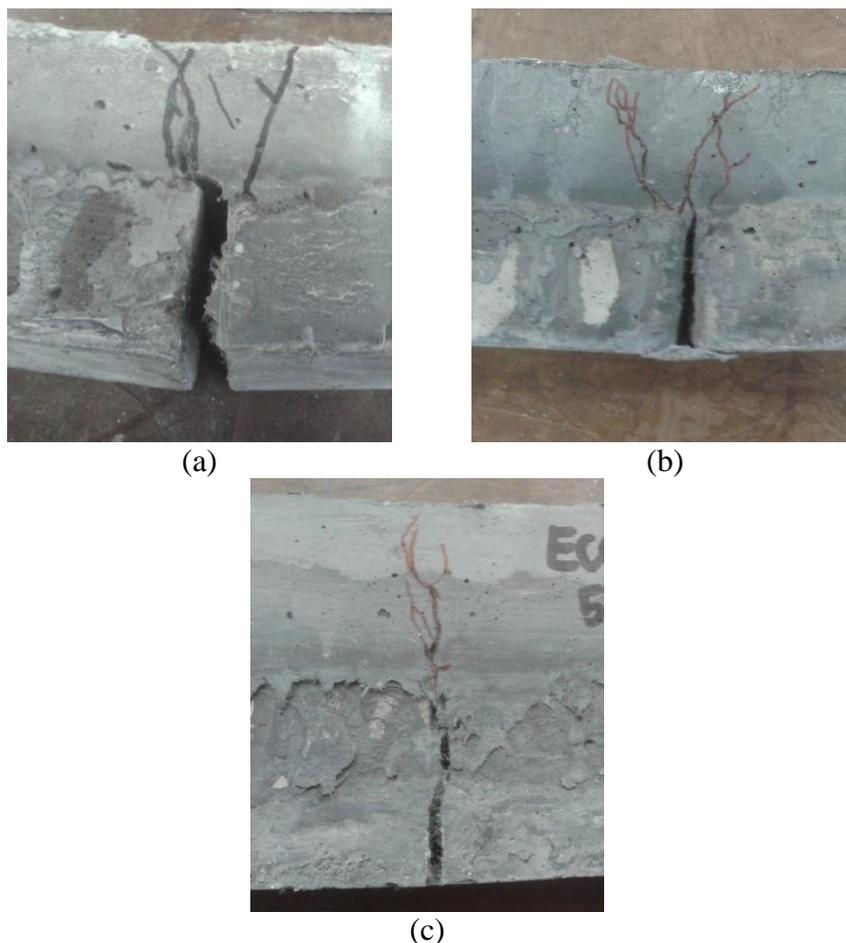


Figura 75 - Fissuração na região da junta existente no concreto da viga composta por compósito/concreto: altura de 5 cm (a) REF (b) 30% 8h (c) 30% 4h.

Para a altura de 5 cm de compósito nota-se, de maneira geral, que todos os traços estudados apresentaram várias fissuras na região da junta existente no concreto. Para o compósito de referência percebe-se que na união compósito-concreto na junta existente no concreto há uma tendência de deslocamento do compósito no concreto. O compósito com 30% de CCA moída por 8 horas apresentou várias fissuras se espalhando pelo compósito na região da fissura existente no concreto. Já para o compósito com 30% de CCA moída por 4 horas nota-se o aparecimento de poucas fissuras, resultado que pode explicar o comportamento encontrado na Figura 75 (c).

### 6.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura

No intuito de compreender a interface da matriz cimentícia com a fibra foi realizada uma microscopia eletrônica de varredura dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. A Figura 76 (a) (b) (c) mostra as imagens escolhidas para a visualização da

interface fibra-matriz do compósito cimentício de elevada capacidade de deformação com 30% de cinza de casca de arroz moída por 8 horas.

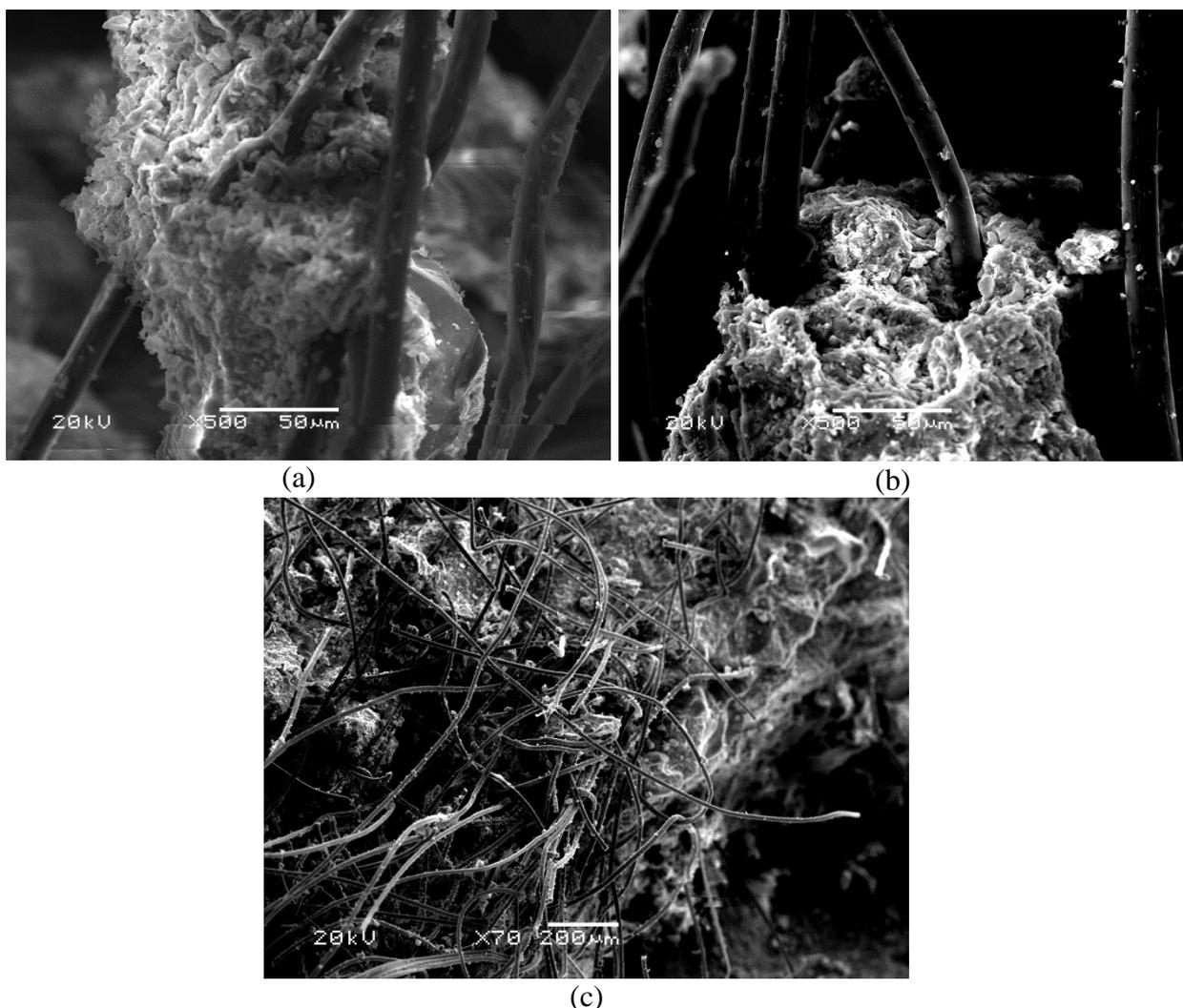


Figura 76 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.

Na Figura 76 (a) (b) é possível perceber que as fibras estão interlaçadas na matriz cimentícia proporcionando uma boa aderência entre os materiais. Por meio da Figura 76 (c) é possível perceber a dispersão das fibras na matriz cimentícia nos compósitos. As fibras utilizadas neste compósito são de polipropileno de pequeno diâmetro, o que proporciona uma desorientação das fibras ao longo da matriz cimentícia. A análise de MEV também pode ser utilizada para melhor entender a distribuição das fibras na matriz cimentícia destes compósitos.

## 8 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz. São destacados os principais resultados alcançados e listadas as conclusões que podem ser extraídas, além de apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

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

- ✓ Na caracterização química e física da cinza de casca de arroz estudada, a mesma não atende a alguns requisitos mínimos exigidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014), como o ensaio de perda ao fogo, e com isso não poderia se enquadrar como material pozolânico. Entretanto, esta cinza pode ser usada como um material alternativo na substituição do cimento, já que os resultados de atividade pozolânica desta cinza indica que mesmo com a queima não controlada a sua capacidade de desempenho em matrizes cimentícias é elevada. Em relação ao tempo de moagem foi possível perceber que nas moagens de 4 e 8 horas os resultados se mostraram mais satisfatórios. E em relação às porcentagens estudadas, a porcentagem de 30% apresentou melhores resultados.
- ✓ A partir da caracterização mecânica dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação pode-se perceber que compósitos com cinza de casca de arroz se tornam alternativas viáveis. O traço com 30% de cinza de casca de arroz moída por 8 horas obteve melhores resultados, demonstrando ser um traço de melhor desempenho mecânico. E o traço com 30% de cinza de casca de arroz com 4 horas de moagem apresenta-se como outra alternativa do uso da CCA em compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. A moagem de 4 horas se torna mais interessante devido a menor energia gasta para sua moagem.

- ✓ Em relação ao primeiro indicativo de durabilidade dos compósitos por meio do ensaio de absorção e índice de vazios, nota-se que o traço com 30% de CCA moída por 8 horas obteve os resultados mais satisfatórios.
- ✓ Para o ensaio de curva de liberação de calor de hidratação observou que a cinza de casca de arroz é capaz de diminuir essa liberação de calor nas primeiras horas de concretagem, produzindo curvas mais lentas, sem grandes picos de temperatura, o que favorece a prevenção de fissuras autógenas no compósito.
- ✓ Quanto ao ensaio de aderência pelo método de arrancamento, o método de execução do ensaio não se mostrou satisfatório para a avaliação da aderência na interface de compósito-concreto, não se mostrando uma alternativa viável para avaliação desta interface.
- ✓ Com o ensaio de aderência pelo método de cisalhamento oblíquo foi possível se obter um indicativo da aderência entre compósito e o concreto. Os materiais se comportaram como um elemento único demonstrando que existe uma grande aderência entre eles e que, dependendo do uso do compósito, não é necessário nenhum tratamento superficial na interface compósito-concreto.
- ✓ O ensaio de reflexão de fissuras indicou que o compósito utilizado como um material de reparo consegue absorver os esforços e ter boa aderência na interface compósito-concreto, mesmo em regiões de juntas do material.
- ✓ Por meio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi observar um indicativo do comportamento da fibra na matriz cimentícia e interface dos mesmos.

## 8.2 CONCLUSÕES

Considerando os dados experimentais e as constatações descritas acima, pode-se chegar às seguintes conclusões com base nos resultados desta dissertação:

- ✓ Como a produção dos compósitos de elevada capacidade de deformação geralmente necessita maior quantidade de cimento, em torno de duas a três vezes mais que em concretos convencionais, o uso da cinza de casca de arroz favorece a redução da

quantidade de cimento nas misturas e proporciona melhorias no comportamento da tenacidade da matriz cimentícia.

- ✓ A utilização de fibras de polipropileno se torna uma realidade para os compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação, sem a necessidade de importações de outras fibras.
- ✓ Os dados coletados indicam que o compósito cimentício de elevada capacidade de deformação possui uma boa aderência na interface compósito-concreto se tornando uma alternativa de material de reparo.

Como conclusão geral tem-se que:

**Os compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com o uso de cinza de casca de arroz sem controle de queima na porcentagem de 30% com tempos de moagem de 4 e 8 horas e fibras de polipropileno se constituem de uma alternativa promissora para ser utilizado no Brasil como material de reparo.**

Cabe lembrar que mais ensaios devem ser realizados com investigações mais específicas para o uso dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação. Além disso, estas conclusões são derivadas da análise dos resultados deste trabalho e que devem ser confirmadas e avaliadas por estudos adicionais considerando a aplicação prática do material.

### 8.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo deste trabalho se revelou uma gama de possibilidades que pode ser estudada. No intuito de dar continuidade a este trabalho algumas sugestões são descritas para a ampliação do conhecimento dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.

- ✓ Adaptar as dosagens para uma escala real, sob condições mecânicas e ambientais, para verificação do comportamento em uma situação real.
- ✓ Utilizar novos materiais pozolânicos na matriz cimentícia deste compósito.
- ✓ Estudar os compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação em idades iniciais como 7 dias.
- ✓ Estudar a superfície dos compósitos, se necessita ajustes para escalas reais.
- ✓ Estudar porcentagens de substituição maiores que 30%.

- ✓ Estudar o comportamento deste compósito cimentício à fadiga, através de um programa amplo de ensaios sob cargas cíclicas.
- ✓ Realizar ensaios de durabilidade destes compósitos com utilização da cinza de casca de arroz.
- ✓ Analisar o ciclo de vida dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.
- ✓ Analisar o custo e a energia utilizados para a moagem da cinza de casca de arroz.
- ✓ Analisar o custo de produção dos compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação.

## REFERÊNCIAS

ALVES, N.J.D. **Avaliação dos Aditivos Incorporadores de Ar em Argamassas de Revestimento**. Dissertação Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland – Análise Química – Determinação de perda ao fogo: NBR NM 18. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova: NBR 5738. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: NBR 13749. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – índice de vazios e massa específica: NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Materiais Pozolânicos - Especificação: NBR 12653. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Materiais Pozolânicos – Determinação do Índice de Desempenho com Cimento Portland aos 28 dias: NBR 5752. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregado Miúdo – Determinação da Massa específica e Massa específica aparente: NBR NM 52. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Determinação da Resistência de Aderência à Tração: NBR 13528. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland e Outros Materiais em Pó – Determinação da massa específica: NBR NM 23. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados – Determinação da Composição Granulométrica: NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.

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

ASTM C 882: Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used with Concrete by Slant Shear.

ACI 544.4R-88: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009).

BASSI, M.R., **Estudo de Fibra Alternativa de Escória de Alto-forno como Reforça em Matrizes Cimentícias**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BASTOS, P. S. S. **Análise experimental de dormente de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

BARBOSA, M. B. et al. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas do CAD com resíduos de borracha de pneu e cinza de casca de arroz de diferentes composições morfológicas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 48., 2006, Anais... IBRACON, 2006.

BARSOUM, M.W., GANGULY A., **Microstructural Evidence of Reconstituted Limestone Blocks in the Great Pyramids of Egypt**. Journal American Ceramic Society, 2006.

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

BERNARDI, S.T., **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibras de Aramida Kevlar**. Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

BOSHOFF, W.P.; ZIJL, G. P. A. G. **Time-dependent response of ECC: characterization and modeling of creep and creep fracture**. In: International RILEM Workshop on HPRCC in Structural Applications, Honolulu 23-26 may 2005. USA: RILEM Publications, PRO 49, 125-134.

CALLISTER JR, W.D., **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 5 ed., 590 p., LTC, 2002.

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

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

CEZAR, D.S., **Características de Durabilidade de Concretos com Cinza Volante e Cinza de Casca de Arroz com e sem Beneficiamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_07\\_09\\_09\\_36\\_57\\_10\\_levantamento\\_de\\_graos\\_julho\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_07_09_09_36_57_10_levantamento_de_graos_julho_2014.pdf)>. Acesso em: 12 de agosto de 2014.

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

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIN, E. M. R. **Propriedades de pastas de cimento Portland com adição de cinza da casca de arroz**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49, 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: IBRACON 2007. 5p.

COSTENARO, F.L. **Desenvolvimento de concretos com adição de cinza e sílica da casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003, São Carlos.

DAFICO, D. A. **Estudo da dosagem de concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da cinza de casca de arroz**. 2001. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microsilica**. 1995. 286 f. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

DELLA, V. P. **Síntese e caracterização do pigmento cerâmico de hematita, obtida a partir de carepa de aço, encapsulada em sílica amorfa obtida a partir da casca de arroz**. 2005. 145f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

FIGUEREDO, A. D.; TANESI J.; NINCE A.A., **Concreto com Fibras de Polipropileno (CFP)**. Revista Técnica. Edição 66 – Setembro/2002.

FIGUEIREDO, A.D., **Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Boletim Técnico, 2000.

FIGUEIREDO, A.D.; DJANIKIAN, J.G.; HELENE, P.R.L.; SELMO, S.M.S.; JOHN, V.M., **Concretos Especiais**. São Paulo: escola Politécnica – USP, São Paulo, 2004.

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

FERREIRA, C.S. **Desenvolvimento do Processo de Obtenção de Filme Polimérico a partir da Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Centro Tecnológico, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

FRIZZO, B. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade de oxigênio e na absorção capilar do concreto.** 2001. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

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

HIGGINS, D.J., **Properties of Engineering Materials.** London e Arnold, 2 ed, p.495, 1994.

HUANG, X.; RANADE R.; NI, W.; LI, V.C., **Development of Green Engineered Cementitious Composites Using Iron ore Tailings as Aggregates.** Construction and Building Materials Journal, n.44, p. 757-764, 2013.

INTERNATION ORGANIZATION for STANDARDIZATION – ISO 14040: 2010 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework, 2010.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura.** Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil e Urbano, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G. **Sustentabilidade do concreto com altos teores de escória e cinzas volantes.** IBRACON Structures and Materials Journal, v. 2, n. 3, p. 244-253, Sep. 2009. ISSN 1983-4195.

ISAIA, G. C.; GASTALDINI, A. L. G.; MEIRA, L.; DUART, M.; ZERBINO, R. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura.** Ambiente Construído, 2010.

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

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

KESSLER M.K.; SOTTOS, N.R., **White SR. Self-healing Structural Composite Material.** Compos Part A: Appl Sci Manuf, v. 8, n.34, p. 743-753, 2003.

KRISHNARAO, R. V.; SUBRAHMANYAM, J.; KUMAR, T. J. Studies on the formation of black particles in rice husk ash. **Journal of the European Ceramic.** Great Britain, v. 21, n 1, p. 99-104, 2001.

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

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

LI, V. 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. **High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair**, Journal for Restoration of Buildings and Monuments, v.10, p.163-180,2004.

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

MASSAZZA, F. **Pozzolana and Pozzolanic Cements**. In: Hewlett, P.C. (ed), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4<sup>th</sup> edition, Arnold Publishers, London, 1998.

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

NAAMAN, A. E. Development and Evolution of Tensile Strain-Hardening FRC Composites. In: **Seventh RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications** – BEFIB. 2008, Indian, v. 1, pp. 1-28.

NAIR, D. G.; FRAAIJ, A.; KLAASSEN, A. A. K.; KENTGENS, A. P. M. **A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice rusk ashes**. Cement and Concrete Research, 2008.

NEVILLE, A.M., *Propriedades do concreto*, São Paulo, PINI, (1997).

NIVALDO, T.A.F.; DANTAS C.; LEAL, A.F.; BARBOSA N.O.; SILVA C.G.; ALEXANDRE, M.V. **Resistência Mecânica de Compósitos Cimentícios Leves Utilizando Resíduos Industriais e Fibras de Sisal**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n.8, p. 894-902, Campina Grande, 2012.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. Porto Alegre. Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2006.

PRUDÊNCIO, J. R.; SANTOS, S. **Influência do grau de moagem na pozolanicidade da cinza da casca de arroz.** In: workshop sobre reciclagem e reutilização de resíduos como material de construção civil, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1996.

PRUDÊNCIO JR., L. R. et al. **Utilização de resíduos na construção habitacional.** Cinza de Casca de Arroz. Coletânea HABITARE, vol.4, n.8, p.240-261, 2003.

PRUDÊNCIO, L R. **Um estudo visando a identificação das condições de queima da casca de arroz para produção de pozolana branca.** IX Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Artigo Técnico. Foz do Iguaçu. 2002.

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

REGO, J. H. S. **As cinzas de cascas arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento – aspectos de microestrutura das pastas.** 2004. 238f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

REGO, J.H.S.; FIGUEIREDO, E.P., **Viabilidade técnica da cinza de casca de arroz produzida sem controle de temperatura como material substituto ao cimento.** In: International Conference Sustainable Construction Into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement based Materials, 2000, João Pessoa. Proceedings ...João pessoa: Universidade Federal da Paraíba/The University of Sheffield, 2000. P. 255-266.

RÊGO, J. H. S.; FIGUEIREDO, E. P.; NEPOMUCENO, A. A..**A utilização da cinza de casca de arroz residual (CCA residual) como adição mineral ao cimento em concretos.**In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, 2002, Belo Horizonte.**Anais...**Belo Horizonte: Ibracon, 2002. (CD ROM).

RIBEIRO F. H. M.; ARANTE J.; CASSOL V. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz produzida no estado do Tocantins nas propriedades do concreto nos estados plástico e endurecido.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda. **Anais...** Olinda: Ibracon, 2005. (CD ROM).

RODRIGUES M. S.; BERALDO A. L. **Caracterização física e mecânica de argamassas à base de cimento Portland e cinza de casca de arroz residual.** Engenharia Agrícola, 2010.

SANTOS, M.L.P.O., **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Tese de Doutorado em Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** 2006. 150f. Tese

(Doutorado) - Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

SAVASTANO JR., H. **Sistemas de Cobertura para Construções de Baixo Custo: Uso de Fibras Vegetais e de Outros Resíduos Agroindustriais.** In: Utilização de resíduos na construção habitacional. Coletânea Habitar-Programa de Tecnologia da Habitação. Ed: Janaíde Cavalcante Rocha; Vanderley M. John, v. 4, p.93-123, 2003.

SENSALE, G. R. Strength development of concrete with rice-husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v.28, p. 158-160, 2006.

SENSALE, G. R.; DAL MOLIN, D. C. C. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas e durabilidade de concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 43, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Ibracon, 2001. (CD ROM).

SENSALE, G.R.B., **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz.** Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2006, Porto Alegre.

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado.** 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. **Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (CCA).** HOLOS Environment, 2007.

SILVA, E. J. da. **Contribuição para utilização de cinza de casca de arroz na construção civil.** 2009. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. 2009.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à relação álcali-agregado.** Porto Alegre. Doutorado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2007.

SOUZA, J. **Estudo da durabilidade de argamassas utilizando cinzas e casca de arroz no traço.** Campina Grande: UFCG, 2008. 160p. Tese Doutorado.2008.

TASHIMA, M. M, **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Ilha Solteira – São Paulo. Mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia UNESP. Área de Conhecimento Estruturas 2006.

TIBONI, R., **A Utilização da Cinza de Casca de Arroz de Termoelétrica como Componente do Aglomerante de Compósito à Base de Cimento Portland.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

VARGAS, A.S. **Estudo da viabilidade do uso do pó de aciaria elétrica a arco na confecção de blocos de concreto para pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

VIEIRA, F. L.; LIDUÁRIO, A. S.; LOPES, A. D.; BITTENCOURT, R. M.; GUIMARÃES, E. M. **Comparativo da determinação do teor de amorfismo da cinza de casca de arroz (CCA) através de difração de raios – x e método químico.** In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Anais. IBRACON, 2005,372-381.

WANG, S; LI, V.C., **Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash.** ACI Materials Journal, v.104, n.3, p. 233-240, May-June 2007.

WATANABE, P.S., **Concretos Especiais – Propriedades, Materiais e Aplicações.** Relatório Final de Pesquisa Científica FAPESP, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008

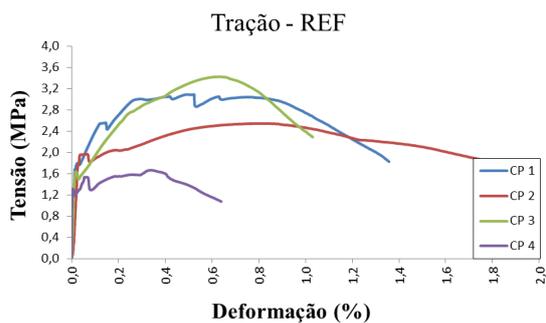
YANG, E.H.; Y. YANG, LI, V., **“Use of High Volumes of Fly Ash Improve ECC Mechanical Properties and Material Greenness”** ACI Materials J., Vol.104, No.6, pp 620-628, NOV-DEC 2007.

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

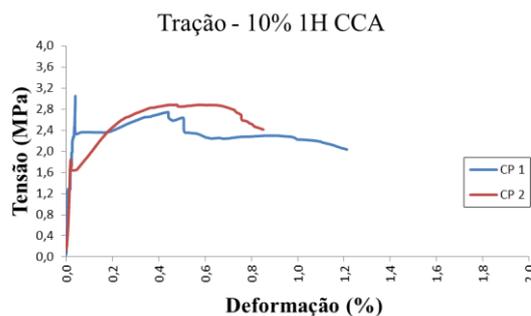
ZHU, Y.; ZHANG, Z.; YANG, Y.; YAO, Y., **Measurement and Correlation of Ductility and Compressive Strength for Engineered Cementitious Composites (ECC) Produced by Binary and Ternary Systems of Binder Materials: Fly ash, Slag, Silica Fume and Cement.** Construction and Building Materials Journal, n.68,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

ZOLLO, R.F. **Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development.** **Cement and Concrete Composites**, v. 19, issue 2, 1997, p.107-122.

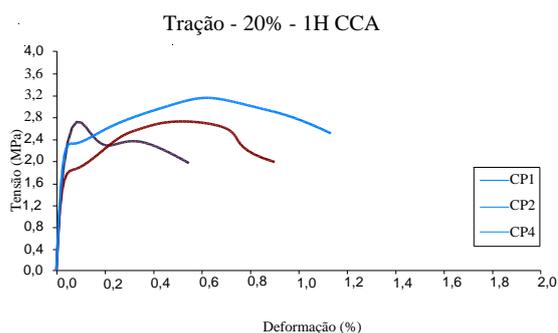
## **APÊNDICE A – Gráficos de Tração Direta**



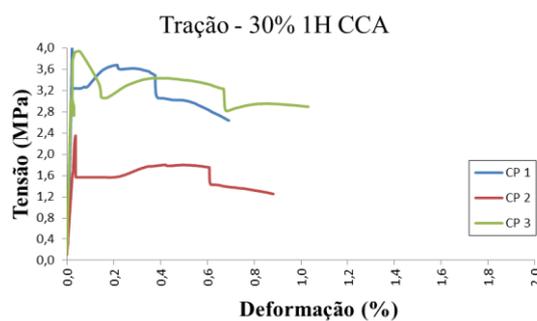
Apêndice A1 – Referência.



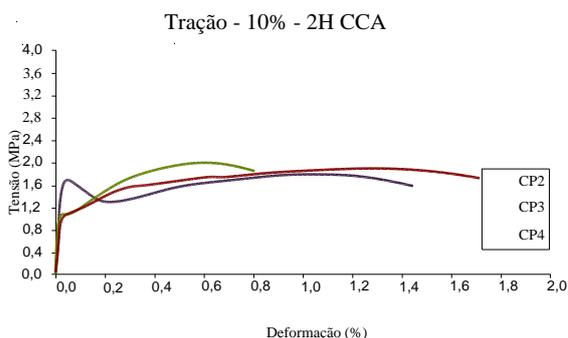
Apêndice A2 – 10% CCA 1h.



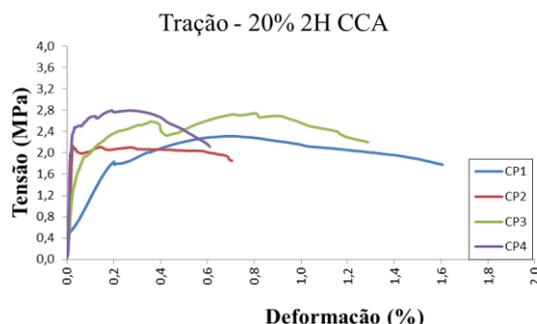
Apêndice A3 – 20% CCA 1h.



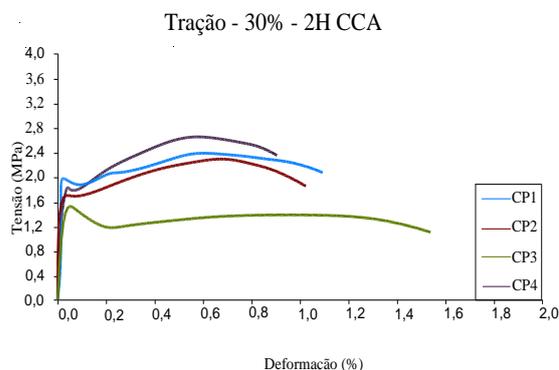
Apêndice A4 – 30% CCA 1h.



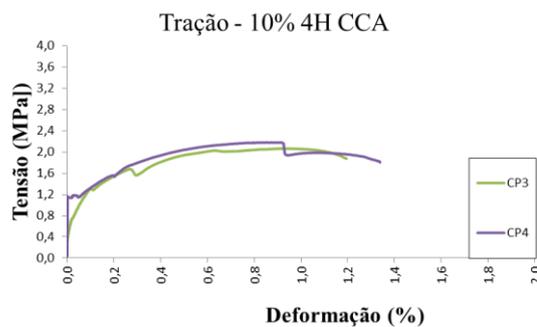
Apêndice A5 – 10% CCA 2h.



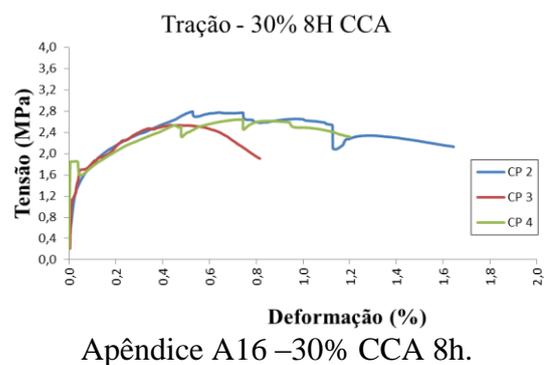
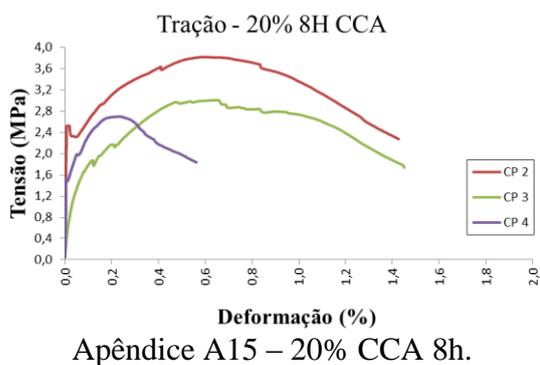
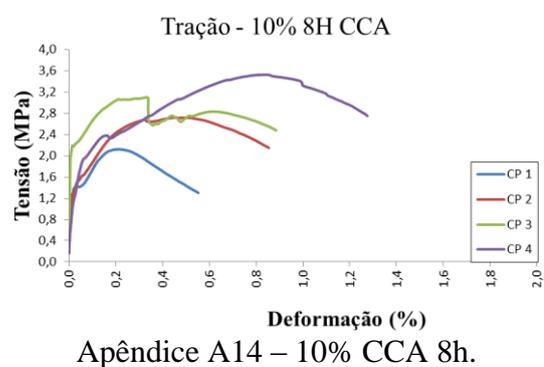
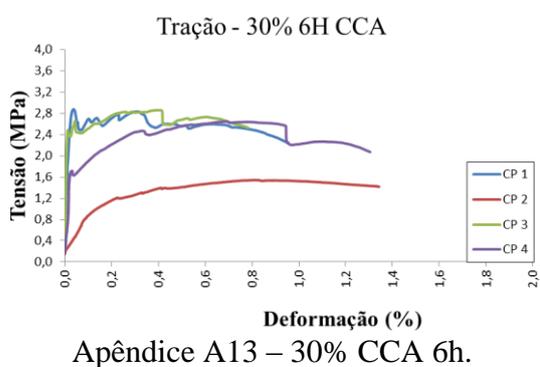
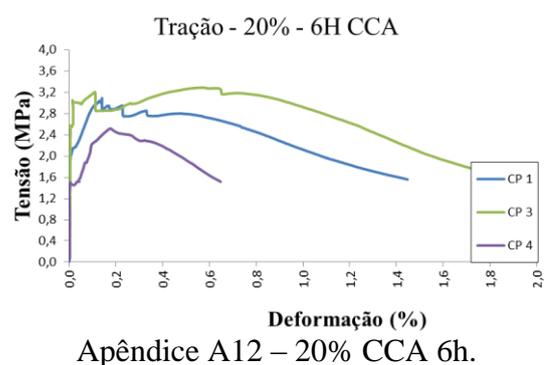
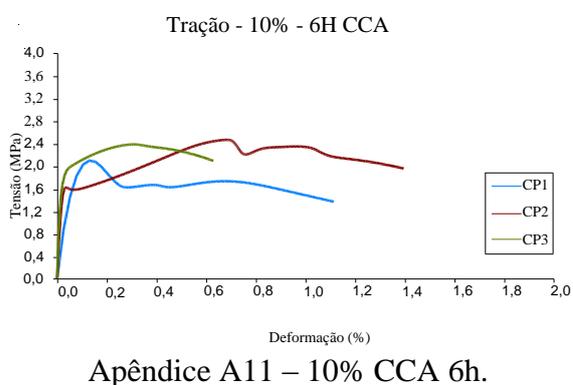
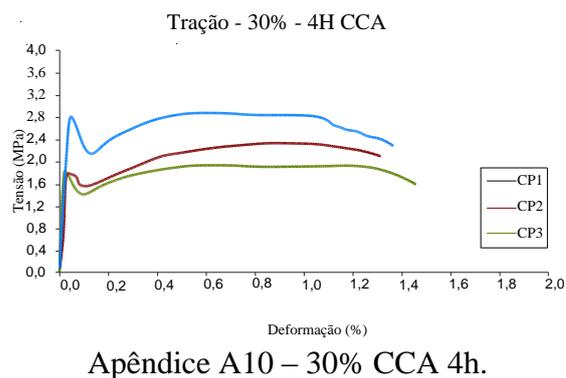
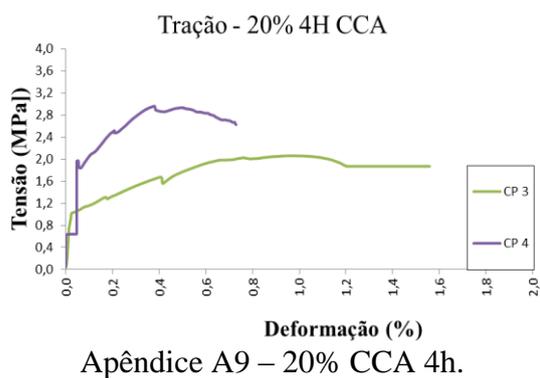
Apêndice A6 – 20% CCA 2h.



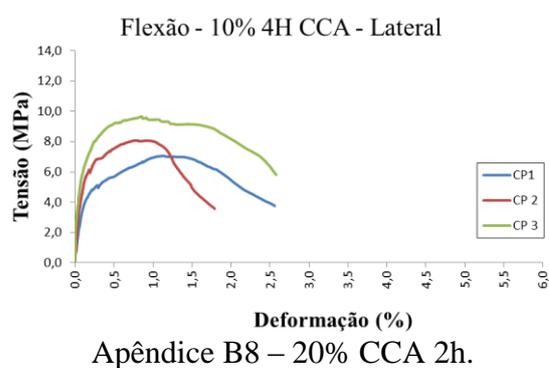
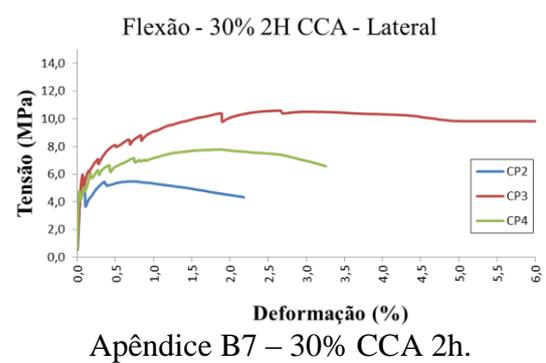
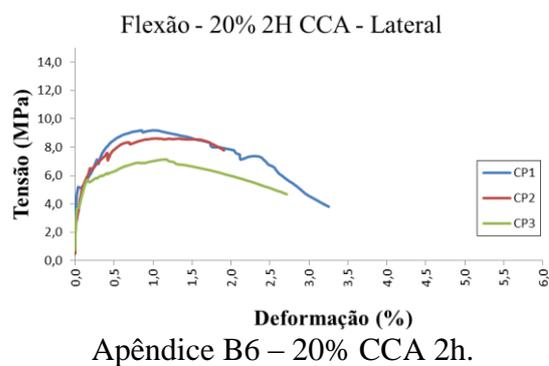
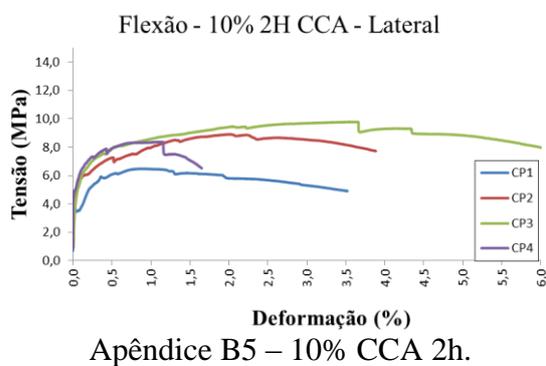
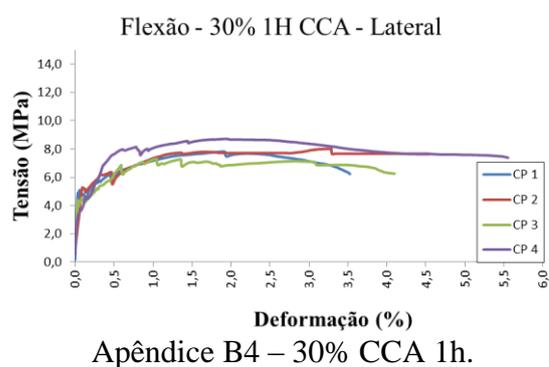
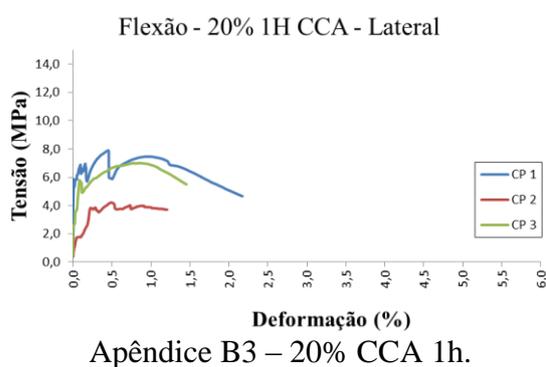
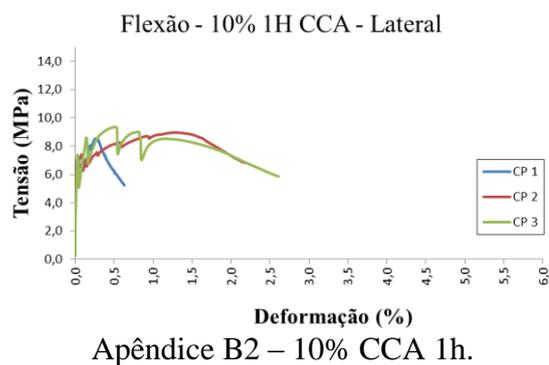
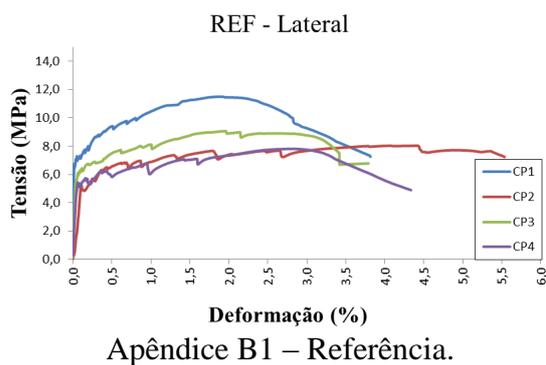
Apêndice A7 – 30% CCA 2h.

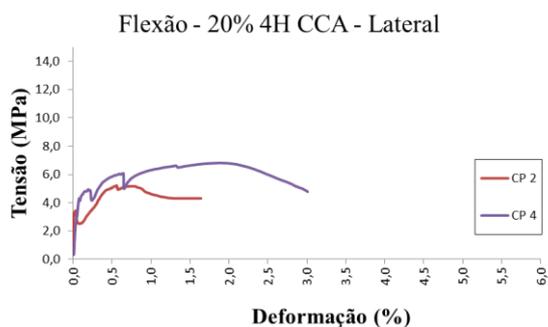


Apêndice A8 – 10% CCA 4h.

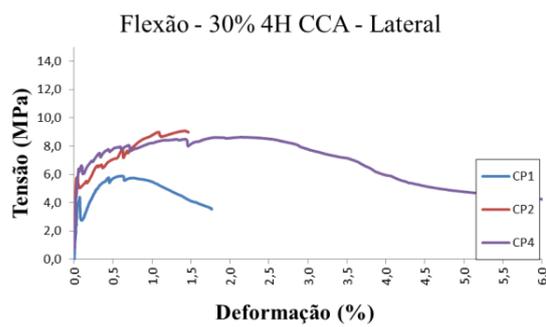


## **APÊNDICE B – Gráficos de Flexão a Quatro Pontos - Lateral**

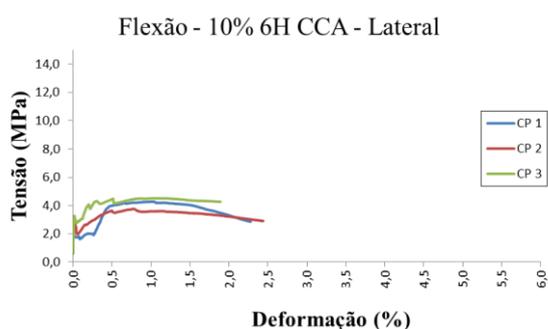




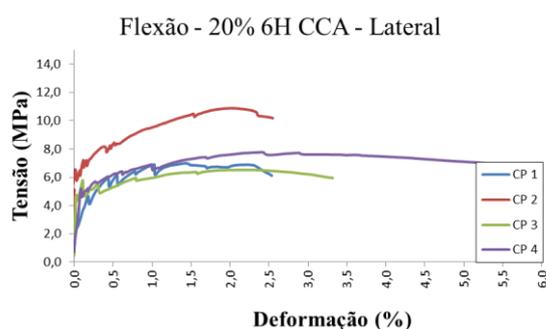
Apêndice B9 – 20% CCA 4h.



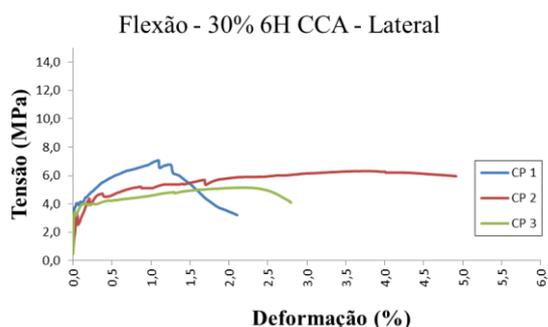
Apêndice B10 – 30% CCA 4h.



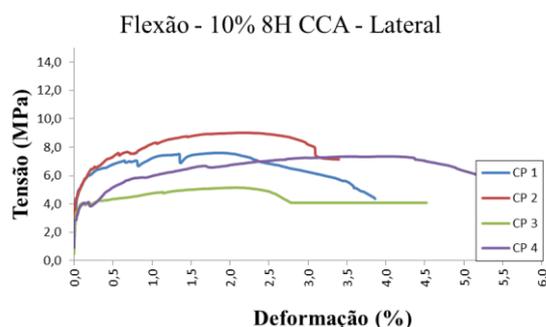
Apêndice A11 – 10% CCA 6h.



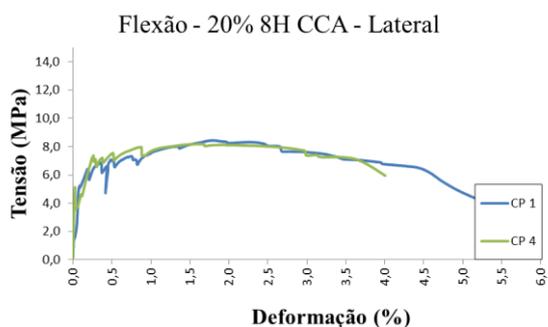
Apêndice B12 – 20% CCA 6h.



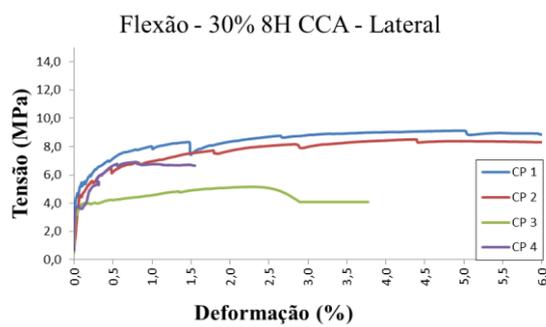
Apêndice B13 – 30% CCA 6h.



Apêndice B14 – 10% CCA 8h.

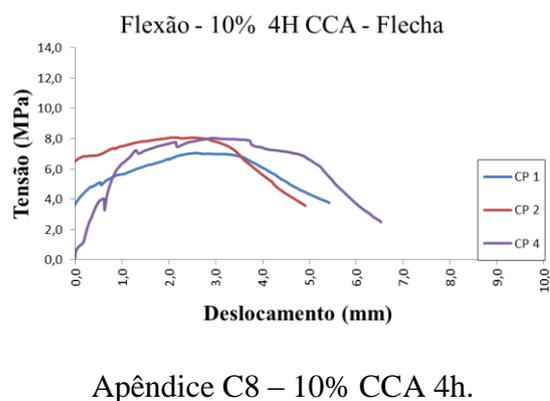
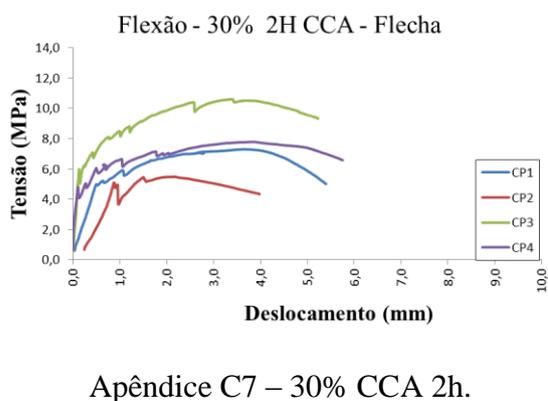
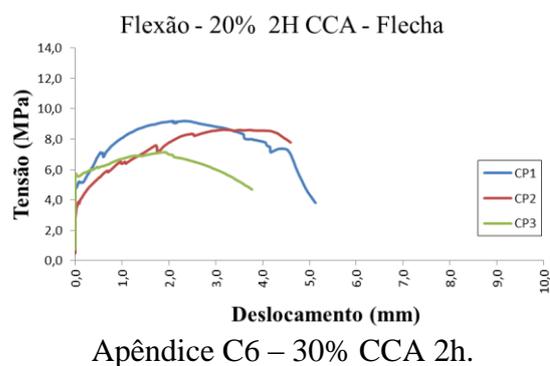
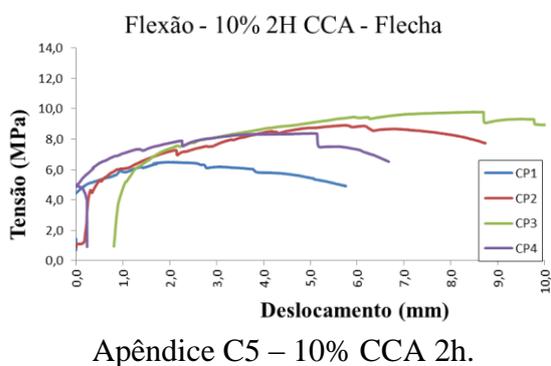
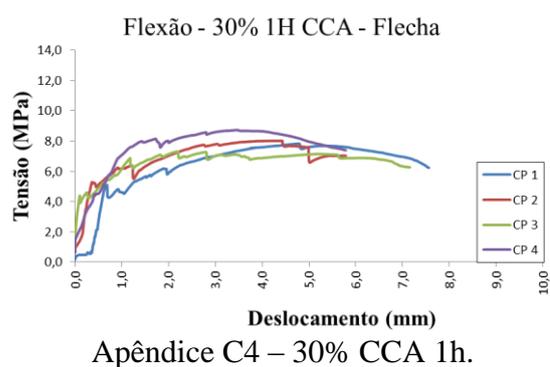
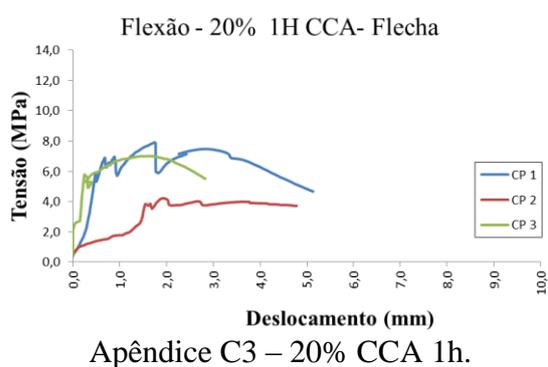
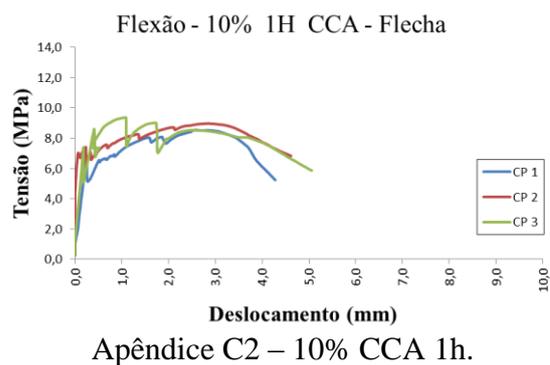
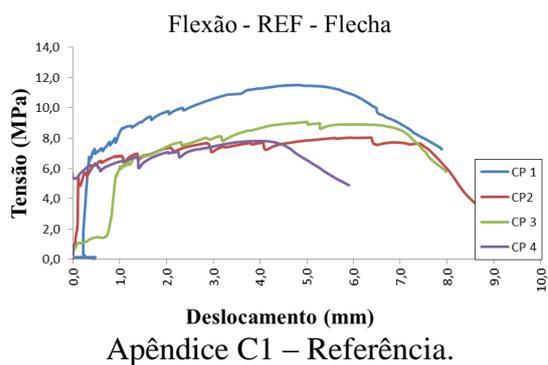


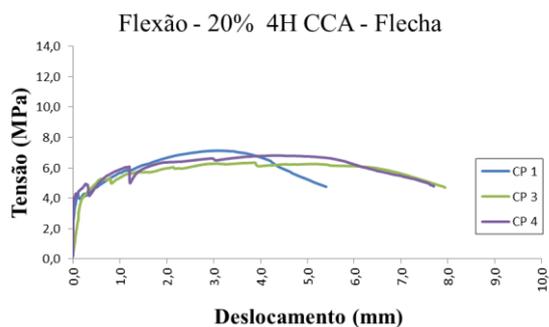
Apêndice B15 – 20% CCA 8h.



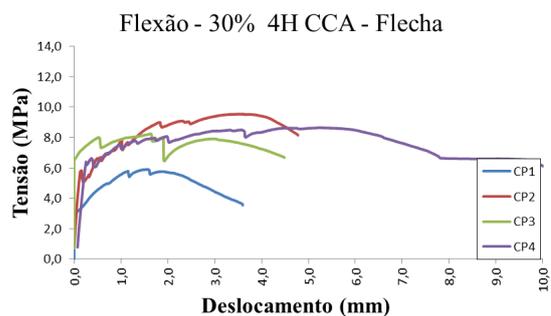
Apêndice B16 – 30% CCA 8h.

## **APÊNDICE C – Gráficos de Flexão a Quatro Pontos - Flecha**

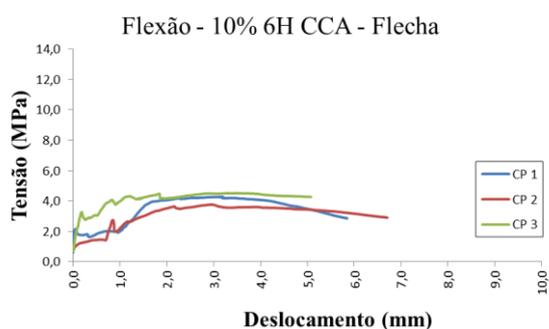




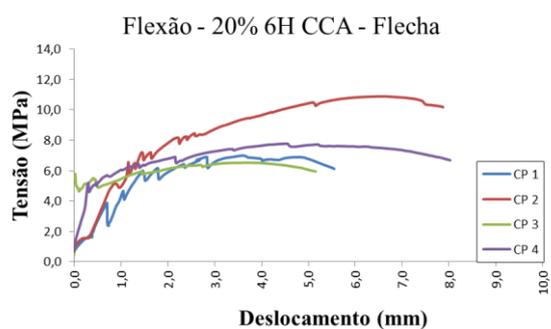
Apêndice C9 – 20% CCA 4h.



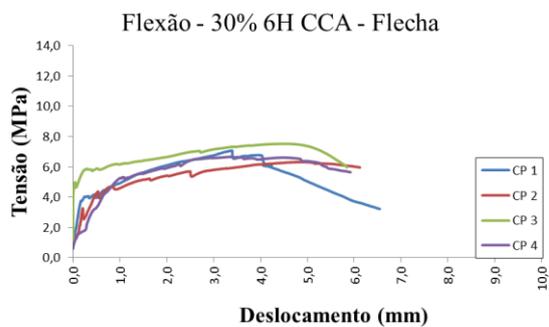
Apêndice C10 – 30% CCA 4h.



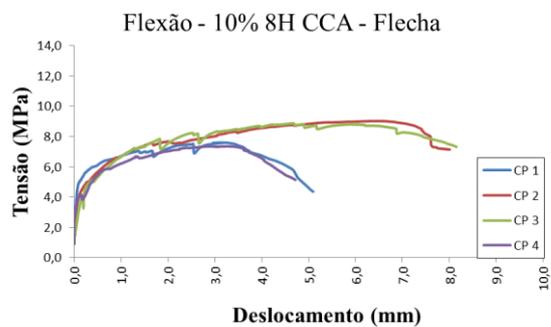
Apêndice C11 – 10% CCA 6h.



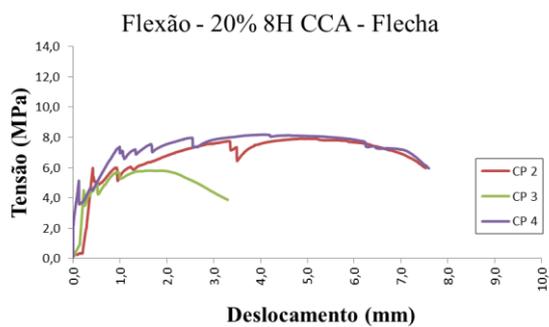
Apêndice C12 – 20% CCA 6h.



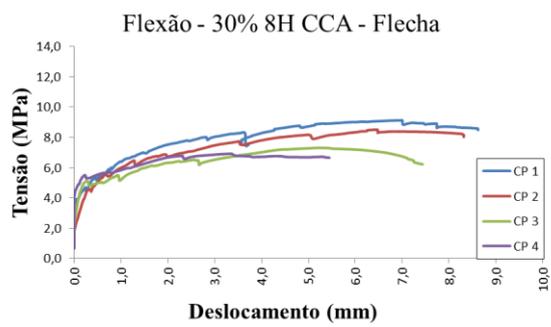
Apêndice C13 – 30% CCA 6h.



Apêndice C14 – 10% CCA 8h.



Apêndice C15 – 20% CCA 8h.



Apêndice C16 – 30% CCA 8h.