



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARIA DAS NEVES PONTES BARATA PERES

**COMPÓSITO DE ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADA POR FIBRA DE  
SISAL COM ENTALHE DEFINIDOS: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E  
MECANISMO DE FALHA**

Belém  
2010

MARIA DAS NEVES PONTES BARATA PERES

**COMPÓSITO DE ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADA POR FIBRA DE  
SISAL COM ENTALHE DEFINIDOS: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E  
MECANISMO DE FALHA**

Dissertação apresentada para  
obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Instituto de  
Tecnologia, Universidade Federal do  
Pará. Área de Materiais e Processos  
de Fabricação. Orientador: Prof. Dr.  
Roberto Tetsuo Fujiyama

Belém  
2010

**Dados Internacionais de catalogação na publicação (CIP), Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém, PA.**

P434c Peres, Maria das Neves Pontes Barata

Compósito de argamassa de cimento reforçada por fibra de sisal com entalhe definidos: caracterização mecânica e mecanismo de falha/ Maria das Neves Pontes Barata Peres; Orientador: Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama. . Belém, 2011.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu* em Engenharia Mecânica, 2011.

1. Argamassa. 2. Compósito. 3. Sisal. I. Fujiyama, Roberto Tetsuo, orientador. II. Título.

CDD 19.ed. 669.94

MARIA DAS NEVES PONTES BARATA PERES

**COMPÓSITO DE ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADA POR FIBRA DE  
SISAL COM ENTALHE DEFINIDOS: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E  
MECANISMO DE FALHA**

Dissertação apresentada para  
obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica, Instituto de  
Tecnologia, Universidade Federal do  
Pará. Área de Materiais e Processos  
de Fabricação. Orientador: Prof. Dr.  
Roberto Tetsuo Fujiyama

Data de aprovação:

Banca examinadora:

\_\_\_\_\_. Orientador  
Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama  
Universidade Federal do Pará/PPGEM

\_\_\_\_\_. Membro Externo  
Prof. Dr. Enrique Mariano Castrodeza  
Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE

\_\_\_\_\_. - Membro Interno  
Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma  
Universidade Federal do Pará/PPGEM

Aos meus pais Maria José Pontes Barata e Mário Luiz Barata (in memoriam) que merecem o meu respeito pelo exemplo que me deram e a quem devo toda minha educação e apoio na vida acadêmica.

Aos meus amados filhos Natália e Danilo, eterna fonte de inspiração e aprendizado e ao pai deles Orlando Peres.

Aos meus irmãos Bete, Eliana e Mário

Aos meus sobrinhos

Ao sentimento que me impulsionou para a realização deste projeto

E a todos que direta ou indiretamente me incentivaram nesta caminhada.

## AGRADECIMENTOS

A Deus e Nossa Senhora, presença certa em todos os momentos;

Ao Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama pela orientação, atenção, amizade, direcionamento do trabalho e sobretudo pela confiança e credibilidade em mim depositada;

Aos professores do Programa de Mestrado de engenharia Mecânica da UFPA: Prof. Dr. Luciano Seabra, Prof. Dr. Roberto Fujiyama, Prof. Dr. Claudio Siqueira, Prof. Dr. Fernando Sá e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carmem Gilda pelo saber transmitido;

Ao Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão do Centro de Geociências e Prof. Dr. Hilton Túlio do Museu Goeldi pelas análises no Microscópio Eletrônico de Varredura;

Aos meus colegas da Pós- Graduação, Ruth Carneiro, Rachel Margalho, Rosa Laura, Junilce Lobato, Epifânio, pelo convívio e amizade e em especial ao Sandoval Ferreira Martins Neto e Paulo Sérgio Lopes Pinto companheiros de pesquisa dos sábados, domingos e feriados intermináveis confeccionando corpos de prova no laboratório;

Ao Michel Carvalho e Izael Pinho pela colaboração nos ensaios mecânicos;

À Universidade Federal do Pará, por proporcionar a busca do conhecimento;

Ao Orlando Peres e nossos filhos Natália e Danilo, pelo apoio, e compreensão nas horas em que me ausentei de seus convívios;

A minha mãe amada Maria José, pelas orações, pela força que me deu para realizar meus projetos acolhendo meus sonhos, meu porto seguro incondicional;

A Mario Luiz Barata (in memoriam) pela contribuição na minha formação pessoal e profissional, que partiu, mas estará para sempre em meu coração;

Aos meus irmãos Elisabete, Eliana pelo carinho e sustentação em todos os momentos e Mário pelo carinho, insistência, persistência e incentivo para concretização deste projeto;

Aos meus irmãos de coração Sérgio, Antonina, Raimunda, Domingos, Rosângela Lameira, Joana e Francisco, à minha tia Edith, à amiga Leó Pinheiro pelas preces e torcida;

Ao Instituto Federal do Pará, e ao Magnífico Reitor do IFPA Prof. Edson Ari de Oliveira Fontes pelo apoio técnico e administrativo;

À Prof<sup>a</sup> MSc. Sabina da Memória, minha amiga e parceira de ideais pelo incentivo, apoio generoso, inestimável e incondicional nos momentos mais difíceis;

Ao Prof. MSc. Jean da Silva Rodrigues pelo generoso auxílio na condução final do trabalho;

À amiga Prof<sup>a</sup> MSc. Vera Lúcia Dias da Silva pela ajuda e colaboração ;

Aos meus amigos e colegas de trabalho do IFPA-PA, Professores da Coordenação de Design Prof<sup>a</sup> Rosângela Gouvea, Prof. MSc. Luiz Samico, Prof. Edilberto Lima, Prof. Adolfo Maia, Prof. Jorge Berredo, Prof. Guilherme Alves e Prof. Pedro Ivanildo (in memorian) pelo apoio e incentivo;

Professores da Coordenação de Construção Civil

Prof. MSc. Wandemir Mata dos Santos Filho, Prof. Sérgio Ferreira, Prof. MSc. Raimundo Expedito Vasconcelos, Prof. MSc. José Zacarias da Silva Júnior, pela valiosa colaboração na realização deste trabalho;

Professores da Coordenação de Metalurgia

Prof. Dr. Otávio Rocha, Prof. Dr. João Lobo Peralta, Prof. Dr. Oscar Jesus Choque Fernandez, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Celina Leal Mendes, Prof. MSc. José Nazareno Santos da Silva, Prof. MSc. Daniel Joaquim da Conceição Moutinho, pelo apoio tecnológico.

Professor da Coordenação de Informática;

Prof. MSc. Ricardo Cabeça de Sousa pelo apoio nos recursos da informática;

A Marcela Soares Santos e MSc. João Bosco Andrade Lobo pelo apoio providencial;

Aos profissionais de saúde, Dr<sup>a</sup> Socorro Mouta, Dr<sup>a</sup> Isaura Campos, Dr<sup>a</sup> Denise Eiró, Dr<sup>a</sup> Patrícia Porpino, Dr. Gilberto Erichsen, Dr. Carlos Alberto Galvão (in memorian), Dr<sup>a</sup> Sônia Yara e Dr. Joaquim João pela paciência e generosidade de tratar minhas dores ;

Ao Herlander Noronha, Kátia Carreira, Lindanor Fonseca, D. Vanda, Charles Moreira, Valério Silveira, S. Euzebio Almeida pelo apoio técnico.

A todos os meus alunos que me impulsionaram na busca de novos conhecimentos;

Aos meus familiares e amigos, pela torcida.

Meus sinceros agradecimentos a todos que pessoalmente ou em pensamento, estiveram ao meu lado nesta jornada, contribuindo para a concretização deste trabalho e realização de um sonho.

Muito Obrigada!

Aprender é descobrir aquilo que você já sabe. Fazer é demonstrar que você o sabe.  
Ensinar é lembrar aos outros que eles sabem tanto quanto você.+

Richard Bach

## RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido um novo material compósito utilizando-se como matriz a argamassa de cimento reforçado com fibra de sisal a 1% em peso, que foram cortadas manualmente nos comprimentos de 15 mm e 25 mm utilizadas sem tratamento superficial utilizando-se o menor nível possível de processamento tecnológico nas etapas de fabricação. A pesquisa foi direcionada para estudar os mecanismos de falha desse novo material. Os compósitos foram produzidos com moldagem manual utilizando-se vibrador de imersão para melhor adensamento. Foram confeccionados corpos de prova da matriz pura e do compósito com fibra de sisal, com entalhes pré definidos, de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaio de flexão em três pontos e correlacionadas com o aspecto fractográfico realizados no Microscópio Eletrônico de Varredura. Os resultados mostraram que a presença das fibras de sisal, inseridas na pasta de cimento, provocou restrição à retração plástica da mistura fresca, possivelmente pela elevada capacidade de absorção de água do reforço fibroso, um incremento na resistência mecânica e aumento da tenacidade do compósito em relação a matriz entre as séries de entalhes, diminuindo a tendência de fratura brusca.

**Palavra- chave:** Compósito. Sisal. Argamassa de Cimento. Ensaio de Flexão. Caracterização.

## **ABSTRACT**

In this work, we developed a new composite material using as a matrix of cement mortar reinforced with sisal fibers to 1% by weight, which were manually cut into lengths of 15 mm and 25 mm used without surface treatment using the lowest possible level of technological processes in manufacturing steps. The research was conducted to study the mechanisms of failure of this new material. The composites were produced with manual molding using immersion vibrator for better densification. Specimens were fabricated of the pure base and with the composites with sisal fiber, with pre-defined slots of 1.7 mm, 3,0 mm and 5,0 mm. The mechanical properties were evaluated by a bending test at three points and correlated with the fractographic appearance made in the Scanning Electron Microscope. The results showed that the presence of sisal fibers, embedded in cement paste, plastic shrinkage caused restriction of fresh mixture, possibly due to high water absorption capacity of fibrous reinforcement, an increase in mechanical strength and increased toughness of the composite over the base between the series of notches, decreasing the tendency to sudden fracture.

**Keywords:** Composite. Sisal. Mortar Cement. Bending Testing. Characterization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Classificação das Fibras .....	26
Figura 2	Esquema da estrutura da fibra de celulose e de uma macrofibra(GRAM,1988; COUTTS,1992).....	28
Figura 3	Agave sisalana(Sisal) .....	31
Figura 4	Esquema de um corpo de prova para ensaio de fratura.....	41
Figura 5	Mecanismos de falhas em materiais compósitos (Anderson, 1995) .....	43
Figura 6	Esquema de carregamento estático.....	44
Figura 7 (a,b)	Diagrama carga- flexão para dois tipos de materiais.....	45
Figura 8	Curva carga deflexão esquemático para compósitos com fibras de baixo módulo.....	47
Figura 9	Fibra de sisal in natura.....	49
Figura 10(a,b)	Fibra de sisal com 15,0 mm e Fibra de sisal com 25 mm.....	49
Figura 11	Cimento CII-Z 32	51
Figura 12	Areia Normal Brasileira, areia embalada e Aspecto visual da (a, b) Areia Normal Brasileira.....	52
Figura 13	A fibra no suporte de papel preparada para o ensaio de tração.....	53
Figura 14	Fibra sendo tracionada.....	53
Figura 15	Esquema dos entalhes.....	55
(a,b,c)		
Figura 16	Molde do corpo de prova em madeira.....	55
Figura 17	Ambiente predial.....	57
Figura 18	Vibrador de Imersão.....	58
Figura 19	Corpo de prova durante a vibração.....	58
Figura 20	Obtenção dos corpos de prova matriz pura e compósito.....	60
Figura 21	Aplicação do desmoldante no molde .....	61
Figura 22	A fibra sendo adicionada a mistura da argamassa de cimento .....	62
Figura 23	Câmara úmida.....	62
Figura 24	Corpos de prova imersos na água.....	63

Figura 25	Regularização das faces das amostras.....	63
Figura 26	Máquina de ensaio universal.....	64
Figura 27	Imagem do MEV e Imagem das amostras analisadas .....	64
(a,b)		
Figura 28	Diagrama típico tensão x deformação do Ensaio de Tração da fibra de sisal.....	66
Figura 29	Seção longitudinal da fibra de sisal sem tratamento .....	66
Figura 30	Balança e Picnômetro.....	67
Figura 31	Análise no Raio X da amostra de argamassa, mostrando as fases encontradas na argamassa.....	68
Figura 32	Matriz com trinca na região mediana.....	69
Figura 33(a, b, c)	Corpos de prova de matriz e compósito com entalhes de 1,7 mm,3,0 mm e 5,0 mm.....	70
Figura 34	Corpo de prova com entalhe de 3,0 mm no ensaio de Flexão em Três Pontos.....	71
Figura 35	Diagrama carga x deslocamento do corpo de prova da matriz pura.....	72
Figura 36	Matriz pura após o ensaio de Flexão em Três Pontos.....	72
Figura 37	Micrografia eletrônica de varredura da matriz pura.....	73
Figura 38	Curva da matriz pura com 3 mm de entalhe.....	74
Figura 39	Imagem do corpo de prova da matriz pura após ensaio de flexão em três pontos .....	74
Figura 40	Micro estrutura da matriz pura com entalhe de 3,0 mm mostrando porosidade e defeitos.....	75
Figura 41	Diagrama carga x deslocamento da matriz pura com entalhe 5,0 mm.....	76
Figura 42	Matriz pura com entalhe de 5,0 mm após a fratura .....	76
Figura 43	Micro estrutura da matriz pura com entalhe de 5,0 mm mostrando porosidade e fissuras.....	77
Figura 44	Diagrama comparativo da matriz pura e entalhes de 1,7mm, 3,0 mm e 5,0 mm.....	77
Figura 45	Diagrama carga x deslocamento do compósito com entalhe de 1,7 mm e comprimento de fibra 15,0 mm.....	79

Figura 46	Compósito de 1,7 mm com comprimento de fibra 15,0 mm após o ensaio de Flexão em Três Pontos.....	79
Figura 47	Compósito de entalhe 1,7 mm e dimensão da fibra 15,0 mm mostrando as bolhas de conformação.....	80
Figura 48	Diagrama carga x deslocamento do compósito com entalhe de 3,0 mm e comprimento de fibra 15,0 mm.....	81
Figura 49	Compósito de cimento e sisal com entalhe de 3,0 mm e comprimento da fibra 15,0 mm.....	81
Figura 50	Imagem do compósito da argamassa de cimento e sisal no MEV, mostrando fibra arrancadas e pull out.....	82
Figura 51	Diagrama curva carga x deslocamento do compósito com entalhe 5 mm e comprimento de fibra 15 mm.....	82
Figura 52	Compósito com comprimento da fibra 15,0 mm e entalhe de 5,0 mm após o ensaio de Flexão em Três Pontos.....	82
Figura 53 (a, b)	MEV do compósito onde observa-se a indicação de pull-out e microfissuras próximo a fibra.....	83
Figura 54	Microfissuras.....	84
Figura 55	Diagrama comparativo do compósito com comprimento da fibra de 15,0 mm e entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm	85
Figura 56	O diagrama carga x deslocamento do compósito com entalhe 1,7 mm e comprimento da fibra 25,0 mm.....	86
Figura 57	Compósito de argamassa de cimento com reforço de sisal de 25,0 mm de comprimento e entalhe de 1,7 mm.....	86
Figura 58	Compósito comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 1,7 mm .....	87
Figura 59	A imagem mostra fissuras próximo à fibra que podem interferir na resistência do material .....	87
Figura 60	O diagrama carga x deslocamento do compósito com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 3,0 mm .....	88
Figura 61	Compósito com 25,0mm de comprimento da fibra e entalhe de 3,0 mm .....	89
Figura 62	Fractografia do compósito de cimento e sisal com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 3 mm.....	89

Figura 63	Compósito mostrando o descolamento da fibra .....	90
Figura 64	Diagrama carga x deslocamento do compósito 25,0 mm de comprimento da fibra e entalhe de 5 mm.....	90
Figura 65	Compósito de argamassa de cimento com reforço de sisal de 25,0 mm de comprimento da fibra e entalhe de 5,0 mm.....	91
Figura 66	Fractografia mostrando a fibra partida, descolada e micro-fissuras.....	91
Figura 67	Diagrama comparativo do compósito com comprimento da fibra de 25,0 mm e entalhes de 1,7mm, 3mm e 5,0 mm.....	92
Figura 68	Diagrama comparativo matriz/compósito entalhe 1,7 mm	93
Figura 69	Diagrama comparativo matriz/compósito entalhe 3,0 mm	94
Figura 70	Diagrama comparativo matriz- compósito entalhe 5,0 mm	95
Figura 71	Resultado dos ensaios de tensão à flexão da matriz pura com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm.....	97
Figura 72	Resultado dos ensaios de tensão à flexão do compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm e entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura.....	99
Figura 73	Resultado dos ensaios de tensão à flexão do compósito com comprimento de fibra de 25,0 mm e entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura.....	100
Figura 74	Resultado dos ensaios de tensão à flexão com entalhe de 1,7 mm,3,0 mm e 5,0 mm de matriz pura, compósitos com comprimento de fibras de 15,0 mm e 25,0 mm.....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Vantagens e desvantagens da fibra vegetal em relação a sintética.....	27
Tabela 2	Propriedades mecânicas e físicas da fibra de sisal.....	32
Tabela 3	Tipos de cimento fabricados no Brasil . ABCP .....	33
Tabela 4	Caracterização do cimento fornecido pelo fabricante.....	50
Tabela 5	Relação cimento e areia.....	56
Tabela 6	Identificação e pesagem dos constituintes da argamassa com os três tipos de entalhe.....	57
Tabela 7	Caracterização das fibras de sisal não tratadas.....	65
Tabela 8	Resultados do ensaio de flexão da matriz pura com os três tipos de entalhe.....	97
Tabela 9	Resultados do ensaio de flexão com os três tipos de entalhe do compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal de 15,0 mm de comprimento .....	98
Tabela 10	Resultados do ensaio de flexão com os três tipos de entalhe do compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal de 25,0 mm de comprimento.....	99
Tabela 11	Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal com entalhe de 1,7 mm.....	101
Tabela 12	Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal com entalhe de 3,0 mm.....	101
Tabela 13	Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal com entalhe de 5,0 mm.....	102
Tabela 14	Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento e sisal com comprimento de fibra de 15,0 mm e 25,0 mm sem entalhe.....	105

Tabela 15	Comparação dos resultados do ensaio à Flexão em Três Pontos da matriz pura sem entalhe com a matriz com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm.....	105
Tabela 16	Resultados comparativos do ensaio à Flexão em Três Pontos do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 15,0 mm.....	105
Tabela 17	Resultados comparativos do ensaio à Flexão em Três Pontos do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 25,0 mm.....	106
Tabela 18	Resultados da tenacidade à fratura com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm da matriz pura e compósito s com comprimento de fibra 15,0 mm e 25,0 mm.....	107

## NOMENCLATURAS

IFPA	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITACIMPASA	Itaituba Industria de Cimento do Pará
MP	Matriz Pura
CP	Corpo de Prova
DP	Desvio Padrão
ASTM	American Society for Testing and Material
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
UFPA	Universidade Federal do Pará
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECIFICO.....	20
<b>1.1.1 Objetivo geral .....</b>	<b>22</b>
<b>1.1.2 Objetivo especifico.....</b>	<b>22</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	24
2.2 FIBRAS NATURAIS EM MATERIAIS COMPÓSITOS.....	25
<b>2.2.1 Principais tipos de fibras naturais com emprego na construção civil....</b>	<b>28</b>
2.2.1.1 Fibras de juta.....	28
2.2.1.2 Fibras de coco.....	29
2.2.1.3 Fibras de sisal .....	30
2.3 ARGAMASSA DE CIMENTO.....	32
<b>2.3.1 Cimento Portland.....</b>	<b>32</b>
2.3.1.1 Hidratação do cimento.....	34
<b>2.3.2 Areia.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.3 Água.....</b>	<b>35</b>
2.4 COMPÓSITO DE MATRIZ DE ARGAMASSA DO CIMENTO REFORÇADA COM FIBRAS NATURAIS.....	36
<b>2.4.1 Emprego de fibras na construção civil.....</b>	<b>37</b>
2.5 DEFORMAÇÕES EM ARGAMASSAS DE CIMENTO.....	38
<b>2.5.1 Retratação.....</b>	<b>38</b>
2.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS.....	40
<b>2.6.1 Mecânica da fratura linear elástica .....</b>	<b>40</b>
<b>2.6.2 Comportamento à fratura dos materiais compósitos.....</b>	<b>42</b>
<b>2.6.3 Tenacidade à fratura dos materiais compósitos trincados.....</b>	<b>43</b>
2.7 ENSAIO DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS.....	44
2.8 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA.....	48
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>49</b>
3.1 MATERIAIS.....	49

<b>3.1.1</b>	<b>Fibra de sisal.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Cimento.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Areia.....</b>	<b>51</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Água.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2</b>	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização de fibra de sisal.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Caracterização da argamassa de cimento.....</b>	<b>54</b>
3.2.2.1	Cimento.....	54
3.2.2.2	Areia.....	54
<b>3.2.3</b>	<b>Fabricação dos moldes de corpo de prova com entalhe pré-definido.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Confeção dos corpos de prova.....</b>	<b>56</b>
3.2.4.1	Fabricação dos corpos de prova da matriz pura.....	56
3.2.4.2	Fabricação dos corpos de prova de materiais compósitos.....	60
3.2.4.3	Procedimento de cura dos corpos de prova de matriz pura e materiais compósitos.....	62
<b>3.2.5</b>	<b>Ensaio de flexão dos corpos de prova com entalhes pré-definido.....</b>	<b>63</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Análise da superfície de fratura.....</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>65</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL.....	65
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO.....	67
4.3	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	68
4.4	ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS COM ENTALHE PRÉ-DEFINIDO E FRACTOGRÁFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA.....	70
<b>4.4.1</b>	<b>Corpo de prova da matriz pura.....</b>	<b>71</b>
4.4.1.1	Corpo de prova da matriz pura com entalhe de 1,7 mm.....	71
4.4.1.2	Corpo de prova da matriz pura com entalhe de 3 mm.....	73
4.4.1.3	Corpo de prova da matriz pura com entalhe de 5 mm.....	75
4.4.1.4	Resultado comparativo da matriz pura com entalhe de 1,7 mm, 3 mm e 5,0 mm de espessura.....	77
<b>4.4.2</b>	<b>Corpo de prova do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de fibra de 15,00 mm.....</b>	<b>78</b>
4.4.2.1	Corpo de prova com entalhe de 1,7 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de fibra de 15,0 mm.....	78

4.4.2.2	Corpo de prova com entalhe de 3,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de fibra de 15,0 mm.....	80
4.4.2.3	Corpo de prova com entalhe de 5,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 15,0 mm.....	82
4.4.2.4	Resultado comparativo entre matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm de comprimento com entalhes de 1,7 mm, 3,0 Mm e 5,0 mm de espessura.....	84
<b>4.4.3</b>	<b>Corpo de prova de compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm.....</b>	<b>85</b>
4.4.3.1	Corpo de prova com entalhe de 1,7 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm.....	85
4.4.3.2	Corpo de prova com entalhe de 3,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm.....	88
4.4.3.3	Corpo de prova com entalhe de 5,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm.....	90
4.4.3.4	Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 25,0 mm de comprimento com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura.....	92
<b>4.4.4</b>	<b>Análise comparativa dos resultados da matriz pura e compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 15,0 mm e 25,0 mm para cada tipo de entalhe.....</b>	<b>93</b>
4.4.4.1	Resultado comparativo entra a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento com entalhe de 1,7 mm de espessura.....	93
4.4.4.2	Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento com entalhe de 3,0 mm de espessura.....	94
4.4.4.3	Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento com entalhe de 5,0 mm de espessura.....	95
<b>4.4.5</b>	<b>Análise do resultado do ensaio de flexão em três pontos.....</b>	<b>96</b>
4.4.5.1	Determinação de tenacidade a fratura nos corpos de provas entalhado....	106

**5 CONCLUSÃO.....108**

**REFERÊNCIAS.....110**

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido esforços consideráveis para desenvolver compósitos de cimento reforçados com fibras naturais a preços acessíveis contribuindo para o crescimento da produção de infra-estrutura (H. SAVASTANO JR. et al, 2009).

A habitação popular, em nosso país e em outros com igual ou pior índice de desenvolvimento, ainda é precária, sendo o déficit de moradias resultante de dificuldades nas condições econômicas da população, somando-se ainda a esta situação o alto custo de alguns materiais de construção tradicionalmente comercializados. A inserção de novas tecnologias, com a utilização de materiais locais, apresenta-se como alternativa de redução no custeio das habitações e sua aplicabilidade mostra-se possível, na medida em que esses novos métodos construtivos tenham a confiabilidade de desempenho demonstrada por investigações científicas.

A extração, utilização e degradação dos recursos naturais alteraram a biosfera ao longo da evolução humana. Até a década de 50 o crescimento econômico ocorreu sem cuidados ambientais com a emissão de poluentes para a atmosfera, ou de resíduos ao meio ambiente. A opinião pública pouca influência exercia quanto a essas questões e a legislação existente era elementar. Entretanto, na década de 60, houve um maior cuidado com a preservação ambiental. Porém a partir dos anos 80 até os dias de hoje, fortaleceu-se a idéia de prevenção para evitar a geração de resíduos, que vão da reciclagem até a reutilização. Nos países mais desenvolvidos, em função do nível mais alto de degradação destes recursos, a educação das políticas ambientais foi aperfeiçoada e amparada por uma legislação bastante rigorosa.

O desenvolvimento tecnológico depende em grande parte, dos avanços na área de materiais. Muitas das estruturas concebidas nos mais diversos campos da engenharia foram possíveis devido ao melhor aproveitamento das propriedades de materiais tradicionais, tais como aço, alumínio, cerâmica e concreto (LIMA, 2004). A Engenharia dos Materiais tem como um de seus objetivos a inovação tecnológica para produção de novos materiais atendendo o desenvolvimento sustentável. Os projetos de engenharia presentemente devem ter o

cuidado com os aspectos ambientais, visando à redução dos impactos ao meio ambiente desde a extração de recursos até a degradação do material final processado quando de seu descarte. A aplicação de novos materiais provenientes de fontes renováveis vem se tornando mais freqüente e algumas iniciativas bem sucedidas com relação à qualidade do produto e à responsabilidade social tem se tornado referência.

O homem utiliza elementos de reforço para materiais frágeis, melhorando suas propriedades mecânicas desde os tempos remotos. O uso de fibras naturais, tais como palha e crina de cavalo eram usadas como reforço de matrizes de argila e gesso, na composição de materiais de construção, assim como as de asbestos em argila, há 4500 anos. Segundo BRESCANSIN, 2003 a utilização de fibras vegetais no Brasil começou na PUC - Rio em 1979, onde foram utilizados estudos com fibra de coco reforçando argamassa de cimento.

Uma grande variedade de fibras naturais, incluindo sisal, coco, juta, bambu e fibras de celulose, tem sido usadas como reforço de matrizes de argamassas de cimento em diferentes países, (BRESCANSIN, 2003). As publicações científicas sobre utilização de fibras vegetais como material de engenharia cresceram bastante.

Existem vários tipos de reforços que podem ser usados em materiais compósitos. Há pesquisas sobre a utilização de fibras de sementes como o algodão; fibras de caule como a juta, o linho e o cânhamo; fibras de folhas como a bananeira, o sisal, a piaçava, o curauá; fibras do fruto como o coco; e fibras de raiz como o zacatão e a mandioca, entre outras. As fibras vegetais passaram a ser também estudadas para reforço de componentes destinado a construções rurais e/ou de interesse social, pelo seu baixo custo e a abundância. A elevada capacidade de absorção de energia em decorrência do baixo módulo de elasticidade dessas fibras naturais é uma das principais vantagens.

A fibra de sisal se mostra promissora no desenvolvimento de materiais compósitos devido ao seu baixo custo, boas propriedades mecânicas e disponibilidade no mercado (SILVA, 2003). Para o caso das fibras de sisal (*Agave sisalana*), as possibilidades para o Brasil, especialmente para o Norte e o Nordeste do país, são várias devido à extensa variedade de espécies de sua flora, resíduos de algumas indústrias.

A relevância do tema em questão ressalta a possibilidade de se pesquisar e caracterizar produtos de base tecnológica para a minimização de falhas catastróficas em materiais de alta fragilidade, no caso da argamassa de cimento, em associação com reforço de fibras naturais, as quais são biodegradáveis e de grande disponibilidade na região Amazônica.

A utilização de resíduos vegetais na obtenção de produtos para a construção é uma das ferramentas mais úteis para controle e diminuição dos problemas ambientais causados pelo descarte, lançamento em aterro ou queima desses materiais.

A argamassa de cimento, por apresentar alta fragilidade, é muito sensível a falhas por colapso brusco. Neste trabalho realizou-se estudos com o objetivo de minimizar os casos de falhas repentinas na presença de fibras de sisal, como reforço.

O presente trabalho poderá contribuir para a área de materiais compósitos reforçados com fibras, como material alternativo para o setor de construção civil.

## 1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo estudar os mecanismos de falha e o comportamento mecânico a flexão em três pontos de materiais compósitos de argamassa de cimento reforçados com fibras de sisal, dispostas aleatoriamente com pré-trincas definidas utilizando-se o menor nível possível de processamento tecnológico nas etapas produtivas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os métodos de fabricação dos materiais compósitos com matriz de argamassa de cimento reforçados com fibra de sisal.
- Analisar a influência dos entalhes de 1,7 mm; 3,0 mm e 5,0 mm nos corpos de prova em ensaio de flexão de três pontos.

- Analisar o comportamento mecânico do compósito de matriz cimentícia reforçados com fibras de sisal avaliando a influência do comprimento da fibra nas propriedades mecânicas do compósito na presença do entalhe em flexão em três pontos.

-Estudar, por fractografia, os mecanismos de falha dominantes para cada série de compósitos produzida

-Correlacionar as propriedades mecânicas dos compósitos com o aspecto fractográfico

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Para CALLISTER JR., 2002 compósito como é qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades.

Os compósitos podem ser definidos como materiais constituídos por uma mistura de fases macro componentes compostas por materiais que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma. O aglomerante do material é chamado de matriz, que tem por função envolver os componentes, ou seja, compõe a forma do material. A matriz atua ainda como uma base que confere ductilidade e mantém a estrutura coesa e que, em resumo, contribui para que o conjunto se caracterize por boas condições de fabricação e a necessária flexibilidade. Os componentes inseridos na matriz atuam geralmente como substâncias de reforço ou enchimento da matriz, sendo as propriedades dos compósitos dependentes da natureza e das propriedades do reforço e da matriz (RODRIGUES, 2008).

O preço de fabricação de determinados produtos em material compósito pode ser também bem menor quando comparado com os materiais metálicos. A performance está vinculada à procura por uma melhor atuação de componentes estruturais, principalmente quanto às características mecânicas (resistência à ruptura, resistência a ambientes agressivos, etc.). PEREIRA, 2000 afirma que o caráter anisotrópico dos materiais compósitos é o fator primordial para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente. A leveza, juntamente com as excelentes características mecânicas, faz com que os materiais compósitos sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas.

Os compósitos são materiais heterogêneos e tem as propriedades de acordo com a proporção e característica de cada componente, motivo pelo qual é importante conhecer e estudar as características físico-mecânicas para avaliar corretamente o material.

Existem vários métodos para a previsão teórica das propriedades física e mecânica dos materiais compósitos, sendo a regra das misturas a mais empregada.

Através desta regra pode-se prever as propriedades mecânicas dos materiais compósitos conhecendo-se as propriedades mecânicas individuais de seus componentes e suas respectivas frações volumétricas.

Uma forma geral de apresentar a regra das misturas é através da equação (1)

$$P_c = P_f V_f + P_m V_m \quad (1)$$

Onde :

$P_c$  é a propriedade mecânica do material compósito

$P_f$  é a propriedade mecânica da fibra usada como reforço do material compósito.

$P_m$  é a propriedade mecânica da matriz do material compósito.

$V_f$  é a fração volumétrica da fibra do material compósito.

$V_m$  é a fração volumétrica da matriz do material compósito

Entretanto, o valor das propriedades do material compósito  $P_c$ , calculado de acordo com a equação 1 é indicado para material compósito com reforço de fibra contínuas e alinhadas no contorno da matriz e a tensão é aplicada no sentido do alinhamento da fibra.

## 2.2 FIBRAS NATURAIS EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos reforçados com fibras naturais têm motivado atualmente discussão de temas relacionados à preservação do meio ambiente e em função do desenvolvimento de novos métodos e processos tecnológicos (FRAGA, *et al.*, 2006; WANG; SAIN; COOPER, 2006).

As atuais preocupações relacionadas à preservação do meio ambiente têm estimulado a busca e o desenvolvimento de novos materiais a serem utilizados na indústria têxtil, automobilística, construção civil, mobiliário, dentre outras (KIM, *et al.*, 2006; DEMIR *et al.*, 2006; KAVELINE; ERMOLAEVA; KANDACHAR, 2006). Este estudo é de grande importância, pois assegura condições de sobrevivência e qualidade de vida para as próximas gerações, utilizando-se produtos naturais, que estão, em grande quantidade, disponíveis e que podem minimizar o uso de materiais tradicionais.

As fibras naturais apresentam uma série de vantagens sobre as sintéticas justificando assim sua utilização como reforço de matrizes cimentícias. Para SEDAN et al, 2007 as fibras são materiais de baixa densidade rendendo relativamente compósitos leves, que podem exibir elevada resistência à tração, e são renováveis e baratos comparados aos das fibras transformadas (artificial).

Segundo SILVA 2002, o que se chama de fibra é, em verdade, um conjunto de filamentos individuais formados por fibrilas unidas por componentes químicos orgânicos não cristalinos (lignina e hemicelulose). Estas fibrilas são compostas por moléculas de celulose e estão orientadas em ângulos distintos, formando as diversas camadas que compõem a macro fibra. Esta composição química determina a estabilidade aos efeitos da degradação, propriedade importante para o uso em compósitos.

Segundo PERSSON e SKARENDAHL (1984, p.8) as fibras são classificadas em fibras naturais e fibras feitas pelo homem, conforme se pode observar na Figura1.

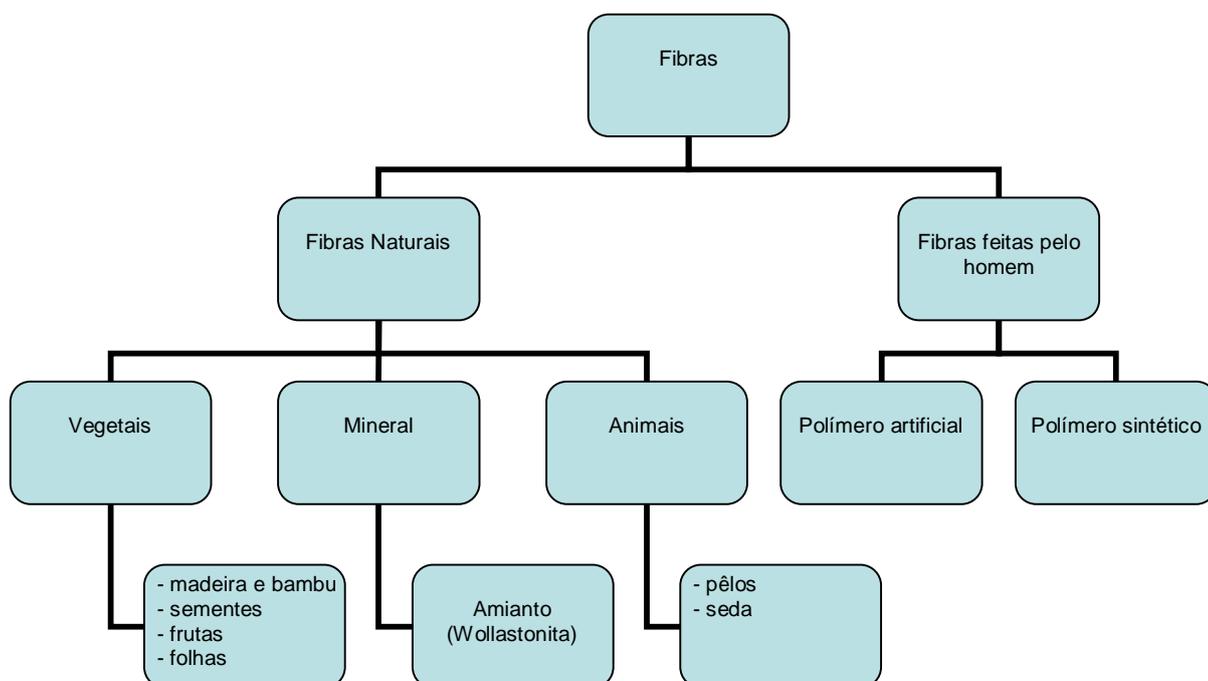


Figura 1 - Classificação das Fibras, PERSSON e SKARENDAHL, 1984

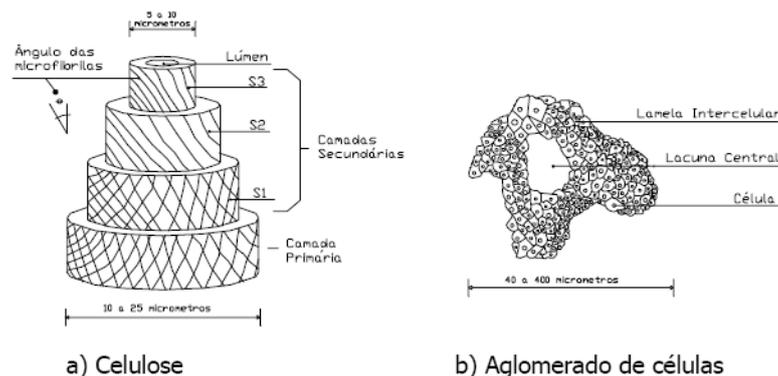
Algumas vantagens e desvantagens das fibras vegetais em relação às sintéticas podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1- Vantagens e desvantagens da fibra vegetal em relação à sintética

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Conservação de energia	Baixa durabilidade quando usada como reforço em matriz cimentícia
Grande abundância	Variabilidade de propriedades
Baixo custo	Fraca adesão em seu estado natural a inúmeras matrizes
Não é prejudicial à saúde	
Possibilidade de incremento na economia agrícola	
Prevenção de erosão	
Baixa densidade	
Biodegradáveis	

As fibras são constituídas por células individuais que, por sua vez, compõe-se de microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação. As microfibrilas são ricas em celulose, polímero vegetal de cadeias longas (grau de polimerização da ordem de 25 000), e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa (grau de polimerização da ordem de 50 a 200) SAVASTANO, 2000. Segundo COUTTS (1992), as células da fibra são constituídas por quatro camadas de microfibrilas e possuem dimensões de 10  $\mu m$  a 25  $\mu m$  de diâmetro. A seguir identifica-se as camadas:

- 1 - Camada primária - mais externa de estrutura reticulada;
- 2 - Camada secundária - S1, de estrutura também reticulada;
- 3 - Camada secundária - S2, onde as microfibrilas estão orientadas segundo um ângulo é com relação ao eixo longitudinal da célula espiral;
- 4 - Camada secundária - S3, mais interna, também com as microfibrilas em forma de espiral. A camada S2 é a de maior espessura e, também, a de maior teor de celulose. No interior da célula, há uma cavidade central de seção elíptica, de dimensões de 5  $\mu m$  a 10  $\mu m$ , denominada lúmen. As diversas células que compõem a fibra, encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e, principalmente, lignina (70% em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade que se chama lacuna.



**Figura 2 - Esquema da estrutura da fibra de celulose e de uma macrofibra(GRAM,1988; COUTTS,1992**

Para SALES, 2006, alguns aspectos devem ser observados na escolha do tipo de reforço usado. As fibras vegetais longas costumam ter orientação em uma direção e espaçamentos pré-determinados, dentro da matriz. Já as fibras curtas, freqüentemente são menores que 50 mm e distribuídas aleatoriamente. Há uma contradição entre a geometria que permite a facilidade de manuseio da mistura e aquela requerida para otimizar a eficiência do compósito endurecido. Fibras longas são mais eficientes no compósito endurecido, mas tornam a mistura pouco trabalhável.

Para frações volumétricas muito altas, as fibras tendem a se agrupar dentro da mistura, resultando em baixa aderência, e a se enrolar. Com relação de aspecto muito alta, as fibras tendem a se enrolar durante a mistura, resultando numa má distribuição do reforço. Em ambos os casos, há propensão à redução da resistência mecânica do compósito. Compósitos com fibras curtas e descontínuas podem ser obtidos com propriedades mais homogêneas e isotrópicas, com orientação planar bidimensional (chapas finas) ou aleatória tridimensional (SALES, 2006).

## **2.2.1 Principais tipos de fibras naturais com empregos na construção civil**

### **2.2.1.1 Fibras de Juta**

Com o nome científico *Corchorus capsularis*, e originária da Índia, a juta é uma fibra resistente e apresenta módulo de elasticidade relativamente elevado, o que a torna conveniente para uso como reforço de matriz cimentícia. Do fio de juta

são produzidos diversos tipos de telas usadas em confecções, decorações, revestimentos de piso e parede, artesanato, cortinas, sacolas, divisórias, base para gesso e sacarias (TOLÊDO FILHO, 1997).

Para LIMA JR, 2007, a juta (*Corchorus capsularis*) é uma herbácea da qual se obtém outra qualidade de fibra têxtil vegetal. Erva lenhosa que pode alcançar uma altura de 3 a 4 metros com caule de aproximadamente 20 milímetros. Cresce, em larga escala, principalmente na Índia e em Bangladesh (antigo Paquistão Oriental), com safra de dois a três meses onde se tem o crescimento de 3 a 5 metros de caule a cada ciclo. Exige um solo fértil e bem drenado e um clima quente e úmido. As altas temperaturas das regiões nas quais a juta é cultivada favorecem a fermentação e desta forma consegue-se a maceração em 8 a 10 dias, facilitando a separação da fibra da parte lenhosa do caule. Introduzida no Brasil por Riyota Oyama, a cultura foi difundida por imigrantes japoneses e hoje é uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica.

A juta fornece valiosas fibras têxteis, extraídas da casca da planta (*Corchorus capsularis*) que cresce até cerca de 2,5 m e tem diâmetro em torno de 25,0 mm na base do caule (D'ALMEIDA, 1987).

SALES, 2006 afirma que testes mostraram aumento das resistências dos compósitos cimentícios com a inclusão de fibras de juta. A fratura dos compósitos sob tração direta e flexão se deu em parte por arrancamento e em parte por ruptura das fibras.

Compósitos baseados nessas fibras exploram o seu longo comprimento. Industrialmente, tanto fibras têxteis tramadas como não-tramadas são impregnadas com resinas ou epóxi e moldadas com conformação complexa, e são usadas como camadas superficiais para materiais, na indústria automotiva inclusive. Compósitos com reforço híbrido de juta e coco provêm alternativas econômicas para a indústria de madeira compensada, envolvendo a produção painéis sanduíche de lâminas de fibras de juta orientadas, sobrepostas entre lâminas de resíduos da fibra de coco com látex.

#### 2.2.1.2 Fibras de coco

Para PINO, 2005, a fibra de coco, também chamada COIR (coco em inglês), é uma massa fibrosa castanho -avermelhada contida entre a casca externa do coco

e o invólucro externo do núcleo. O coqueiro, palma de coco ou coconut palm é talvez a árvore mais conhecida dos trópicos e uma das mais importantes economicamente. O coqueiro cresce nas costas arenosas através dos trópicos e na maioria das regiões subtropicais. Ele é uma palma alta e reta, usualmente de 10 a 20 m de altura, sendo o seu fruto utilizado como fonte de alimentação e bebida, óleo, fibra, combustível, madeira e outros produtos. O coco é cultivado e utilizado na Índia e na Ásia Continental há pelo menos 3000 anos e chegou ao Brasil pela colonização portuguesa .

O Nordeste brasileiro é a região responsável por cerca de 85% da produção nacional e mais de 90% da área plantada, ocupando principalmente os Estados de Alagoas, Sergipe e Bahia. O coqueiro anão - introduzido no Brasil em 1925, vindo da Malásia - não alcança mais do que 10 metros de altura, o que facilita bastante a coleta dos frutos. É mais precoce do que a variedade gigante, iniciando sua frutificação no segundo ano após o plantio, também apresentando maior produtividade, cerca de 200 frutos por pé ao ano. Em compensação, vive apenas 20 anos, ou seja, bem menos tempo do que o centenário coqueiro comum (TASSARA, 1996 apud SANTOS, 2006, p. 27). As fibras de coco são constituídas de materiais lignocelulósicos, obtidos do mesocarpo do coco ( *Cocos nucifera*). Possuem grande durabilidade, atribuída ao alto teor de lignina (41 a 45%) quando comparadas com outras fibras naturais. As fibras normalmente devem ser adicionadas em materiais cujo processamento seja inferior a 220°, pois acima dessa temperatura, observa-se a degradação das mesmas(SANTOS, 2006). Em 2000, a empresa Poematec, situada no Distrito Industrial de Ananindeua/ PA, reabriu o mercado nacional ao desenvolver um projeto de modernização da produção que conseguiu reduzir satisfatoriamente o custo da matéria prima (SANTOS, 2006).

#### 2.2.1.3 Fibra de sisal

O nome sisal é oriundo de uma cidade costeira em Yucatan, México. Tendo como significado, água fria (PERSSON *et al*, 1984). O sisal é uma das fibras vegetais que possui maior resistência à tração e é uma das mais indicadas para reforço de argamassas. No Brasil a espécie cultivada é a *Agave Sisalana* ( Figura 3), sendo que o Estado da Bahia contribui com 85% do total da produção da fibra (SILVA, 2004).



**Figura 3** É Agave sisalana (Sisal)

Milhares de famílias residem em zonas semi árida do México, vivem em uma situação econômica precária. Este é principalmente o resultado de investimento agrário deficiente através dos anos, o que motivou os agricultores a abandonar para os seus campos e imigrar para grandes cidades à procura de novas oportunidades, na maioria dos casos sem sucesso. O restante da população sofre por causa da seca extrema e falta de apoio financeiro, tanto reduzindo a sua produção colheita e a falta de habitação acessível. Por isso são necessárias investigação de alternativas técnicas que visam melhorar a habitação rural e a utilização de materiais locais (JUÁREZ, 2005).

A fibra de sisal, conhecida por sua grande resistência mecânica, está entre as mais investigadas como reforço de materiais compósitos, sendo disponível a um custo razoável, pois a planta cresce em vários ambientes tropicais e renova-se rapidamente. As fibras são extraídas das folhas, que têm dimensões entre 6 e 10 cm de largura e entre 50 e 250 cm de comprimento. Cada fibra é, na verdade, um feixe de microfibras ocas, com comprimento entre 1,0 e 1,5 m e diâmetro em torno de 0,1 e 0,3 mm (SALES 2006). TOLÊDO FILHO, 1997, observou aumento de cerca de 15% no diâmetro dessas fibras após oito dias de imersão em água, podendo causar perda da aderência com a matriz. Segundo SALES, 2006 argamassas com fibras de sisal apresentaram menor trabalhabilidade que as fibras de coco, pela maior capacidade de absorção e maior relação de aspecto.

Em ensaios de arrancamento com corpos-de-prova de argamassa de cimento com uma fibra de sisal, com comprimento inserido entre 7,5 e 50 mm, a resistência de aderência ficou entre 0,32 e 0,76 MPa. Foi observada a ocorrência de

arrancamento da fibra para pequenos comprimentos inseridos, e ruptura para comprimentos maiores. Como em muitos sistemas as fibras maiores que 25,0 mm falharam por ruptura, esse valor foi sugerido como comprimento crítico para a fibra de sisal (SALES 2006).

A Tabela 2 mostra as propriedades físicas do sisal apresentando grande variabilidade, assim como ocorre para outras fibras vegetais. Isto pode ser explicado pela espécie de planta, local de plantio e metodologia de ensaio

Tabela 2 - Propriedades mecânicas e físicas da fibra de sisal

Referência	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura	Alongamento (%)	Massa Específica (Kg/m <sup>3</sup> )	Diâmetro ( $\mu$ m)
Guimarães (1987)	14,9	176	-	29,2	-	-
Chand <i>et al</i> (1988)	9,4-22	530-640	-	3-7	1450	50-300
Toledo Filho (1997)	10,94-26,70	227,8-230	-	2,08-4,18	750-1070	80-300
Savastano e Agopyan (1998)	15,2	347-378	4,9-5,4	-	1370	-
Aziz et al (1984)	13-26	280-568	3-5	-	-	-
Joseph et al	9-20	400-700	5-14	-	-	-

Segundo LEVY NETO; PARDINI, 2006 apud RODRIGUES 2008, p.29 a fibra de sisal possui seção transversal arredondada, porém irregular e variável, decrescendo em relação as extremidades livres das folhas. Além disso, a resistência à tração das fibras de sisal não é uniforme ao longo das mesmas. Todos esses fatores contribuem para elevar a variação das propriedades mecânicas das fibras, influenciando, conseqüentemente na qualidade do compósito.

## 2.3 ARGAMASSA DE CIMENTO

### 2.3.1 Cimento Portland

O cimento Portland é constituído principalmente de material calcáreo, como rocha calcárea ou gesso, alumina e sílica, encontrados em argilas e xisto. As argilas

também contêm alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ) e álcalis na mistura de matérias primas tem efeito mineralizante na formação de silicatos de cálcio. Quando não estão presentes quantidades suficientes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas matérias primas principais, estes são propositadamente incorporados à mistura por adição de materiais secundários, como a bauxita e o minério de ferro (METHA & MONTEIRO, 1994). No Brasil a classificação do cimento Portland, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, regulada pelo Comitê Brasileiro-18 (Cimento, Concreto e Agregados) tem critérios próprios onde são definidos os tipos pelas siglas CPI, CII, CIII, CIV E CPV. A norma designa os cimentos portland pela sigla e classe de resistência. A sigla corresponde ao prefixo CP acrescido do algarismo romano I ou II, sendo a classes de resistências indicadas pelos números 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão. A Tabela 3 mostra os tipos de cimento fabricados no Brasil pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

Tabela 3- Tipos de cimento fabricados no Brasil - ABCP

Sigla	Designação do cimento Portland	Classes(*)	Normas Regulamentadoras
CPI	Comum	25-32 e 40	EB-1/NBR5732
CPS	Comum com adição	25-32 e 40	EB-1/NBR5732
CII-E	Composto com escória	25-32 e 40	EB-2138/NBR11578
CII-Z	Composto com pozolana	25-32 e 40	EB-2138/NBR11578
CII-F	Compostocom filler	25-32 e 40	EB-2138/NBR11578
CIII	Compostode alto forno	25 e 32	EB-208/ NBR5735
CIV	Compostocom pozonânico	25 e 32	EB-758/NBR5736
CPV-ARI	Comp. com alta resistência inicial	34(aos 7 dias)	EB-2/NBR5733

(\*)- Expressa em termos de resitência mínima à compressão aos 28 dias de idade em MPa.

O cimento Portland comum (CPI), sem adições, é constituído pela mistura de silicato de tricálcico ou alita( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ou belita( $\text{C}_2\text{S}$ ), Ele possui ainda constituintes menores como óxido de cálcio, óxido de magnésio, além de álcalis, fosfatos, fluoretos e sulfatos, que normalmente formamsoluções sólidas com silicatos

e aluminatos de cálcio. As adições de material carbonático, escória de alto forno e material pozolânico são comuns, porém são limitados ao total de 5% ( ABNT).

Como constituintes menores, podem estar presentes óxido de cálcio, óxido de magnésio, além de álcalis, fosfatos, fluorestos e sulfatos, que normalmente formam soluções sólidas com silicatos e aluminatos de cálcio.

O constituinte mais importante do cimento Portland é o  $C_3S$ , por ser o de maior quantidade e também contribuir significativamente para a resistência mecânica do cimento hidratado.

#### 2.3.1.1 Hidratação do Cimento

O estudo da água dos poros da argamassa é de grande importância para a durabilidade dos compósitos de cimento reforçados com a fibra de sisal.

Chama-se hidratação a reação química do cimento com a água, a qual gera produtos com características de pega e endurecimento transformando compostos anidros mais solúveis em compostos hidratados menos solúveis MEHTA e MONTEIRO, 1994; PETRUCCI, 1975. Os compostos presentes no cimento Portland, como visto anteriormente, foram obtidos através de reações a altas temperaturas (clinquerização) e por isso estão em um estado de energia elevada. Quando estes compostos reagem com a água (hidratação), os mesmos tendem a atingir estados de baixa energia, e este processo é acompanhado pela liberação de energia na forma de calor (reações exotérmicas) (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Para LOURENCI, 2003, sendo o cimento formado por vários compostos, estes não se hidratam à mesma velocidade, como por exemplo, os aluminatos se hidratam muito mais rapidamente que os silicatos. Desta forma, as reações de hidratação dos aluminatos nos permitem analisar a perda de consistência (enrijecimento) e a solidificação (pega), visto que os aluminatos são os primeiros a se hidratar. Na fase do enrijecimento a pasta ainda é trabalhável com as mãos, mas após o início da pega a pasta não se torna mais trabalhável. Os silicatos, em maioria na pasta (presentes em 75% do cimento), são responsáveis pelo aumento de resistência (endurecimento).

### 2.3.2 Areia

Segundo PETRUCCI, 1975, os agregados são materiais granulares, sem forma e volume definidos, geralmente inertes e de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. Uma de suas maiores aplicações está na confecção de argamassas e concretos. São materiais relativamente baratos e têm sido atualmente tratados como material de enchimento inerte. A utilização de agregados de minerais naturais compreende mais de 90% do total de agregados utilizados e devido ao grande potencial de uso, também têm-se os agregados dos rejeitos industriais, tais como escória de alto forno, cinza volante, concreto reciclado e resíduos selecionados de rejeitos urbanos (MEHTA e MONTEIRO, 1994). O agregado utilizado na confecção das argamassas é a areia quartzosa com diâmetro entre 0,06 e 2,0 mm. Podem-se citar ainda os agregados existentes e classificados como filler, pedrisco, seixo rolado e pedra britada. Esses agregados são extraídos diretamente do leito dos rios, por meio de equipamentos para essa finalidade, ou extraídos de minas, onde posteriormente sofrem um beneficiamento consistindo de lavagem e classificação.

### 2.3.3 Água

A água deve ser colocada na quantidade certa, sem excessos nem em pouca quantidade, pois prejudicará a trabalhabilidade e a cura da pasta e, conseqüentemente, a resistência mecânica da pasta. A quantidade e a qualidade da água a ser utilizada também é muito importante, pois a relação água/aglomerante influencia diretamente na resistência, além do que o uso de muita água ainda pode influenciar na porosidade da argamassa. O traço de uma argamassa pode ser apresentado em volume ou em peso, sendo o primeiro mais prático e o segundo mais preciso (VERÇOZA1984 apud, LOURENCI, 2003 p. 31).

## 2.4 COMPÓSITO DE MATRIZ DE ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADA COM FIBRAS NATURAIS

A maior parte das pesquisas nos últimos anos sobre o uso de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias foi motivada pela grande quantidade de fibras disponíveis e pelo fato de elas possuírem alta resistência mecânica (BENTUR, 1990).

Compósitos reforçados por fibras longas, contínuas, são muito mais rígidos e resistentes. Entretanto algumas vantagens importantes podem ser observadas nos compósitos reforçados por fibras curtas e aleatoriamente distribuídas. Por exemplo, o processo de fabricação se torna muito mais rápido e fácil resultando em baixo custo. (SILVA, 2002).

H. SAVASTANO JR. ,2009 afirma que para as fibras curtas aleatoriamente distribuídos na matriz, a eficiência dos elementos de transição tende a ser relativamente baixo em comparação com aquele em compósitos com reforços contínuos e alinhados.

Segundo BERALDO *et al*, 1996, tanto a biomassa vegetal como o cimento tem características e propriedades que influenciam o comportamento do compósito criando incompatibilidades que devem ser consideradas e estudadas. A presença de substâncias químicas, como açúcar, pode retardar ou mesmo inibir a pega do cimento.

SAVASTANO *et al*, 1994, pesquisaram a importância do estudo da zona de interface da biomassa vegetal e o cimento, onde pode ocorrer eventuais descontinuidades, dentro de uma fase ou entre as fases, tais como poros ou fissuras, as quais interferem tanto no comportamento mecânico quanto na durabilidade do material.

AGOPYAN, 1990, afirma que os efeitos das fibras na matriz estão relacionados ao comportamento de ambas. O autor afirmou que, basicamente, se tem três conjuntos fibra-matriz na construção civil: matriz frágil como pastas, argamassas, concretos e plásticos com estrutura cristalina ou ligações cruzadas, com reforço de fibras de vidro, aço, amianto e alguns tipos de plásticos; matriz frágil reforçada com fibras de módulo de elasticidade similar ou até inferior ao da matriz, como as fibras plásticas comuns e as fibras vegetais; matriz dúctil como os plásticos e os metais, com as fibras de módulos de elasticidade similar ou até inferior ao da matriz como as fibras plásticas comuns e as fibras vegetais; matriz dúctil como os

plásticos e os metais, com fibras de módulos de elasticidade geralmente superior ao da matriz.

Segundo o mesmo autor quando as fibras apresentarem baixo módulo de elasticidade, como no segundo caso, acima descrito, não haverá alteração das propriedades da matriz, antes que ocorra sua ruptura; porém, após isso, se houver fibras em quantidade suficiente, elas poderão suportar as cargas aplicadas, conferindo ao compósito propriedades dúcteis. Neste caso, não se deve melhorar as resistências estáticas da matriz, mas apenas aumentar a sua ductibilidade e, conseqüentemente, a sua tenacidade.

SARMIENTO E FREIRE,1996, relatam os diferentes tratamentos físicos ou químicos para evitar a incompatibilidade química com o cimento. Estes tratamentos podem ser lavagem, torrefação, pulverização e impregnação. O objetivo dos métodos são proteger as fibras vegetais contra a agressividade do meio alcalino promovido pelo cimento; imobilizar a matéria orgânica constituinte reduzindo sua capacidade de absorção de água; reduzir ao mínimo a sua interferência nas reações de pega e endurecimento do cimento e melhorar a qualidade do compósito em relação a durabilidade, resistência ao fogo e resistência ao ataque de micro organismos.

#### **2.4.1 Emprego de fibras na construção civil**

TOLEDO FILLHO *et al* 2002 relatam que o uso de fibras vegetais em concreto proporciona um emocionante desafio à indústria de construção de habitação, particularmente em países não-industrializados, pois elas são baratas e modelo de reforço prontamente disponível requerem apenas um baixo grau de industrialização para o seu tratamento e, em comparação com um peso equivalente do mais comum de fibras de reforço, a energia necessária para a sua produção é pequena e, conseqüentemente, o custo de fabricar estes compósitos também é baixa. Além disso, a utilização de uma mistura aleatória de fibras vegetais na produção de matrizes de cimento leva a uma técnica que requer apenas um pequeno número de pessoal treinado para a indústria de construção. Compósitos de fibrocimento vegetal, assim, constituem o desafio e a solução para a combinação pouco convencional de materiais de construção com métodos de construção convencional.

Pastas de cimento e argamassas podem ser reforçadas com fibras vegetais para a fabricação de componentes de construção de paredes finas com formas variáveis (TOLÉDO FILHO et al, 2002).

## 2.5 DEFORMAÇÕES EM ARGAMASSAS DE CIMENTO

### 2.5.1 Retração

A definição superficial de retração é a contração do compósito cimentício devida à perda de água. Não obstante aconteça nas três dimensões do material, a retração é freqüentemente expressa como deformação linear, pois os efeitos da retração são maiores quanto maior a dimensão e é comum que componentes construtivos tenham uma dimensão que prepondera sobre as demais.

Sabe-se, no entanto, que a retração em misturas à base de cimento é, principalmente, um conjunto de efeitos do complexo sistema de secagem, e pode se dar tanto por perda de água para o meio externo, podendo ser chamada de secagem exógena, quanto por adsorção da água para formação de produtos de hidratação do cimento, a secagem endógena (SALES, 2006).

Para SALES *et al.*, 2004 materiais cimentícios estão sujeitos a deformações, independentemente da ação de cargas externas, já nos primeiros minutos após a moldagem dos elementos, quando estão saturados de água e são expostos a ambientes com umidades relativas menores que 100%. Difícil de ser controlada, a retração que se processa durante as primeiras horas vem, algumas vezes, acompanhada de formação de fissuras, geralmente de pequena profundidade e, freqüentemente, quase imperceptíveis. A tendência à fissuração é aumentada em elementos com grande relação área superficial/volume, como é o caso de placas. A retração plástica pode ser creditada ao efeito combinado de alguns eventos que ocorrem logo após a moldagem do componente construtivo, com a mistura cimentícia ainda no estado plástico. Inicialmente, dá-se o assentamento de materiais que compõem a mistura, tais como o cimento, agregados e demais inserções sólidas. Por diferenças de peso específico, a água tende a ascender, podendo haver exsudação seguida de evaporação. Adicionalmente, a retração plástica pode ser agravada por elevadas temperatura ou velocidade do vento.

É comum associar-se o termo retração simplesmente à retração que se dá por secagem da mistura cimentícia quando exposta a um ambiente cuja umidade relativa é tal que provoca a perda de água do material para o estabelecimento do equilíbrio higrométrico. Mas, além desse, existem vários outros tipos de deformação sob a forma de retração, que não necessariamente podem ocorrer de forma simultânea ou serem dependentes uns dos outros.

Quando o concreto está ainda no seu estado fresco, ocorre a perda da água exsudada para a superfície, devido à evaporação da mesma, ou perda de água por sucção das formas, quando estas não estão impermeabilizadas, ou sucção do substrato. A remoção desta água forma uma série complexa de meniscos capilares que criam pressões capilares negativas que provocam contração volumétrica da pasta de cimento. Esta contração, uma vez restringida, seja pela presença de agregados de grandes dimensões ou pela armadura ou qualquer outro fator, provocará tensões de tração e conseqüentemente, fissuração. Tensões de tração também surgem em decorrência de variações diferenciais de volume por toda a massa de concreto pelo fato de que os efeitos da retração não são uniformes por toda esta massa (NUNES e FIGUEREDO, 2007).

A mudança dimensional dos materiais ocorre nas horas iniciais após a colocação da pasta de cimento no molde, havendo uma retração plástica devido a evaporação da água. (TOLEDO FILHO *et al.*, 2005).

A classificação de retrações em materiais cimentícios podem ser nos seguintes tipos (POWERS, 1968, WITTMANN, 1982 apud MELO NETO, 2002, p. 24,25):

\_ **Retração plástica:** ocorre antes do fim de pega, ainda no estado fresco através da evaporação rápida inicial da água de amassamento, pela superfície exposta da mistura cimentícia, resultando em fissuração superficial, facilmente observável.

\_ **Retração por secagem:** acontece depois do fim da pega do cimento e ocorre devido à redução dimensional causada pela evaporação da água de poro da mistura cimentícia. Em um ambiente com umidade abaixo de 100%, na pasta de cimento dá-se a perda de água e a conseqüente retração (POWERS, 1968).

\_ **Retração química:** diminuição dimensional em razão de volume de produtos hidratados ser inferior ao volume de produtos anidros. Também denominada de *contração Le Chatelier*, autor da descoberta do fenômeno.

\_ **Retração autógena:** definida como a mudança de volume sob temperatura constante, e sem perda de umidade da mistura cimentícia para o meio ambiente, é causada pela redução da umidade relativa no interior dos poros em decorrência da evolução da hidratação do cimento (POWERS, 1968). Neste tipo de retração, ocorre o consumo da água dos capilares em razão das reações de hidratação resultando na retração do material.

\_ **Retração ou contração térmica:** Para WITTMANN, (1982) a reação entre o cimento e a água é exotérmica, gerando calor, liberado para o ambiente, sendo parte deste calor liberado nas idades iniciais quando a mistura cimentícia ainda é suscetível a deformações; em grandes volumes parte deste calor é acumulada ocasionando uma expansão térmica. Quando a taxa de hidratação diminui, a temperatura diminui e, como consequência, tem-se a retração térmica ou contração térmica, que pode causar sérios danos a determinadas estruturas.

## 2.6 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS

### 2.6.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica

O propósito da mecânica de fratura é o de identificar critérios como a energia de fratura,  $G_{Ic}$ , e a tenacidade à fratura,  $K_{Ic}$ , os quais são independentes da geometria do corpo de prova (KINLOCH, 1987). Os valores destes parâmetros ajudam a desenvolver um melhor entendimento do processo da fratura e são um benefício considerável nas áreas de formulação e seleção de materiais e no projeto de engenharia.

A determinação dos parâmetros  $G_{Ic}$  e  $K_{Ic}$  serão apresentadas a seguir seguindo o esquema da Figura 4

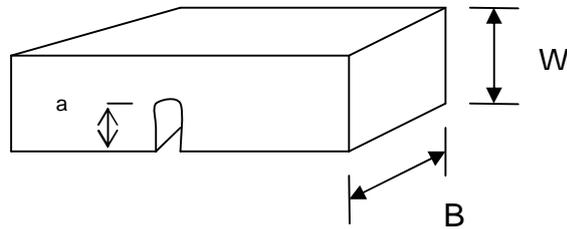


Figura 4- Esquema de um corpo de prova para ensaio de fratura

A energia de fratura é determinada pela Equação (2)

$$G_{lc} = \frac{Uc}{BW\phi} = \frac{Ut - Uk}{BW\phi} \quad (2)$$

onde :

B= espessura

W=altura

$\phi$  = fator de forma o qual depende do comprimento da fissura

$$\phi = \frac{C}{\partial C / \partial (a/W)} \quad (3)$$

C= flexibilidade do material= deslocamento/carga

a= comprimento da trinca

L= distância entre os vãos

Ut=energia total

Uk= energia cinética

Uc= energia elástica

A tenacidade a fratura é calculada através da Equação (4).

$$k_{lc} = \gamma \sigma_c \sqrt{a} = y \frac{3FcL}{2BW^2} \sqrt{a} \quad (4)$$

onde:

Fc= carga de carregamento máxima

$\sigma_c$  = Tensão crítica

$y$  = fator de forma, depende do comprimento da trinca e para um carregamento em flexão de três pontos é dado por:

$$y = \frac{(1,99 - \{a/W(1 - a/W)[2,15 - 3,93a/W + 2,7(a/W)^2\})}{(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}} \quad (5)$$

Os valores de  $G_{lc}$ , e  $K_{lc}$ , podem ser relacionados através do módulo do material para deformação plana:

$$K_I^2 = \frac{EG_I}{(1 - \nu^2)} \quad (6) \qquad G_I = \frac{K_I^2}{E'} \quad (7)$$

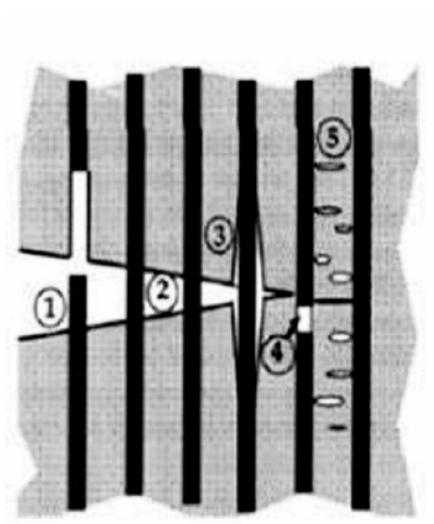
### 2.6.2 Comportamento à Fratura dos Materiais Compósitos

Os mecanismos de falha local que podem ocorrer durante a fratura de um compósito fibrado são: a ruptura das fibras, a deformação e o trincamento da matriz, o descolamento das fibras, o deslizamento interfacial seguido da ruptura das fibras (*pull out*) e ainda o efeito denominado ponte das fibras (*fiberbridging*), onde as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras. Estes mecanismos podem atuar simultaneamente durante o processo de fratura de um compósito. A importância de cada mecanismo no processo de fratura dependerá do tipo de compósito estudado, do carregamento aplicado e da orientação das fibras. Analisando o mecanismo de fratura, verifica-se que a condição interfacial é fator importante e governa o comportamento tensão-deformação dos compósitos. O comportamento das interfaces tem sido estudado por meio de ensaios de deslizamento de uma única fibra (HSUEH,1955). Estes ensaios avaliam o processo de transferência de carga entre a fibra e a matriz.

H. SAVASTANO JR., 2009 et al afirma que o comprimento de fibra é um dos principais fatores que influenciam no processo de transferência de carga da matriz

para as fibras e interferem no efeito de transição das fibras através das fissuras (matriz descolagem e pull-out), que ocorre em um estágio mais avançado de carregamento observado no material à base de cimento.

A Figura 5 mostra os vários mecanismos de falha que podem ocorrer em compósitos reforçados por fibras. A fratura raramente acontece de modo catastrófico, mas tende a ser progressiva com falhas subcríticas dispersas através do material, o que pode ser considerado vantajoso.



**Figura 5: Mecanismos de falhas em materiais compósitos (ANDERSON, 1995)**

- 1- Arrancamento de fibras
- 2 - Ponte de fibras
- 3 - Descolamento fibra/matriz
- 4- Ruptura das fibras
- 5-Trincamento da matriz

### **2.6.3 Tenacidade à Fratura dos Materiais Compósitos trincados**

A avaliação de tenacidade à fratura em compósitos  $K_{IC}$  apresenta dificuldades normalmente não encontradas nos materiais homogêneos, isto ocorre porque esses materiais apresentam propriedades mecânicas que variam com a orientação das fibras. Os materiais com fibras curtas são considerados na prática, como materiais

isotrópicos e desta forma seu comportamento é similar ao de um material homogêneo. Neste caso as técnicas desenvolvidas para materiais homogêneos podem ser aplicadas.

A tenacidade é propriedade da matriz que é mais freqüentemente reforçada pela presença de fibras (H. SAVASTANO JR. et al, 2009).

Para os compósitos reforçados com fibras curtas, a determinação da tenacidade à fratura é mais simples e sendo assim mais comumente utilizada (WONG;MAI, 1998), (ATODARIA et al, 1997). Comparando aos compósitos com fibras longas, estes compósitos possuem menor tenacidade e resistência à fratura, devido, entre outros motivos a concentração de tensão no final das fibras (CHOI; TAKAHASHI, 1996).

## 2.7 ENSAIO DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

Neste tipo de ensaio, os corpos de prova pré-entalhados recebem uma carga. A carga de flexão é aplicada no centro de um corpo de prova específico, apoiado em dois pontos. O valor da carga aplicada versus o deslocamento do ponto central é a resposta do ensaio (GARCIA, SPIM, SANTOS, 2000). Durante este ensaio, os resultados podem ser afetados por vários fatores, como comprimento do vão entre os apoios, velocidade de ensaio e dimensões da seção transversal do corpo de prova. Em cargas simples, os melhores resultados são obtidos em relação ao módulo de ruptura com carga central (RILEM 49). A Figura 6 mostra um esquema de carregamento estático.

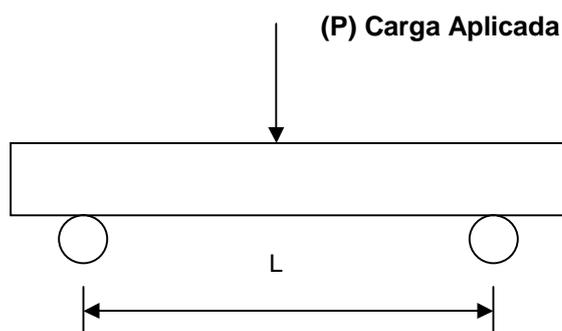


Figura 6 É Esquema de carregamento estático

O valor principal que se determina é a resistência à ruptura transversal ou módulo de ruptura, calculado pela expressão:

$$M_r = \frac{Mc}{J} \quad (8)$$

Onde:

$M_r$  = módulo de ruptura

$M$  = momento de resistência, relativo a carga  $P$  em relação a distância  $L/2$

$c$  = distância do eixo neutro;

$J$  = momento de inércia da seção

Como:

$$M = \frac{P.L}{4} \quad (9)$$

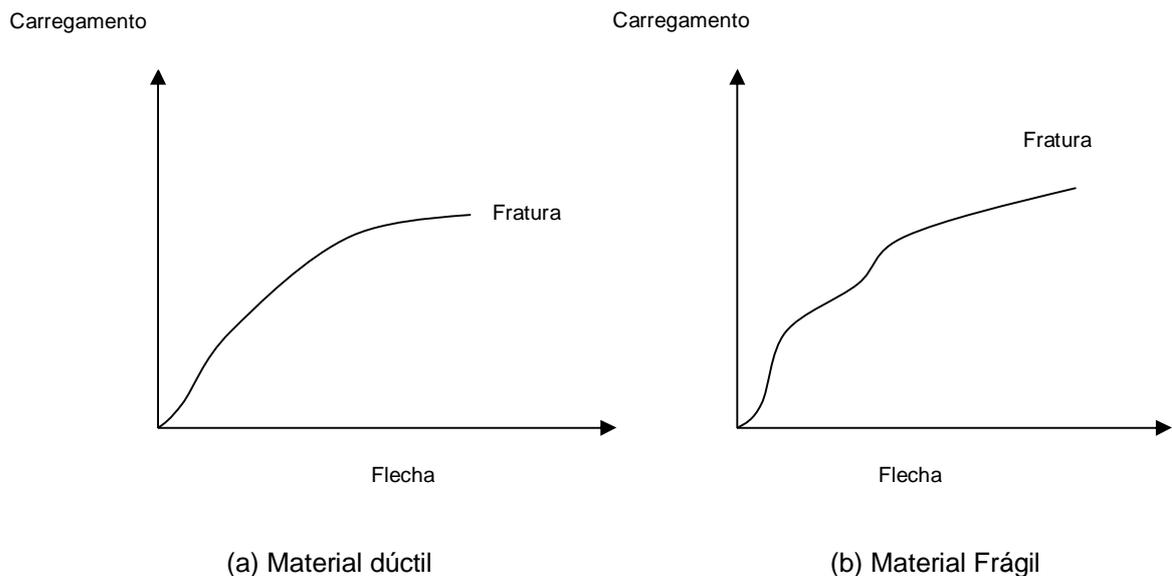
Para seção retangular de base  $B$  e altura  $W$

$$J = \frac{BW^3}{12} \quad (10)$$

Deduz-se  $M_r$  para seções retangulares Equação (11)

$$M_r = \frac{3PL}{2BW^2} \quad (11)$$

O ensaio permite, por intermédio da leitura da flecha, a obtenção de um diagrama de carga-flexão como a Figura 7 (a) e (b) mostra para dois tipos de materiais.



**Figura 7 - Diagrama carga- flexão para dois tipos de materiais**

A rigidez é outro parâmetro que se pode determinar no ensaio de flexão. A equação (12) expressa este parâmetro de:

$$E = \frac{M.L}{3J\phi} \quad (12)$$

E= rigidez na flexão

M= momento de dobramento

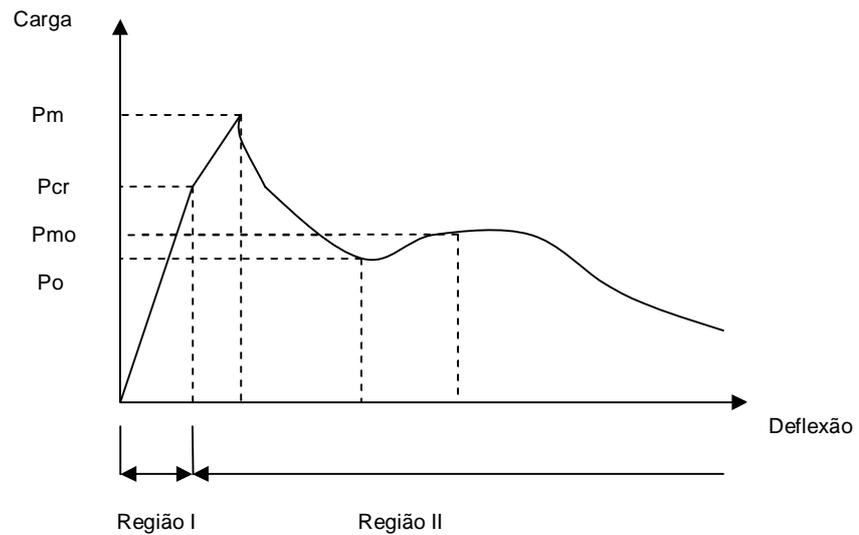
L= distância entre apoios

J= momento de inércia da seção

$\phi$  = deflexão angular

A forma da curva carga-deflexão é definida pelo tipo de fibra, pelo volume e orientação do reforço. Para fibras de sisal ela pode ser esquematizada teoricamente como mostra a Figura 8.

A região I é a zona elástica antes da fissuração, o fim da região I é definido quando acontece a fissuração e a curva desvia na linearidade, a região II é a zona inelástica até a ruptura. As fibras nesta região suportam quase toda a tensão de tração contando com uma pequena contribuição da matriz durante a propagação inicial da fissura, esta região é típica para quando se trabalha com fibras curtas, TOLEDO FILHO *et al.*, 2002 obteve experimentalmente as curvas para compósitos reforçados com fibras de sisal.



**Figura 8** Curva carga deflexão esquemático para compósitos com fibras de baixo módulo.  
**TOLEDO FILHO et al 2002.**

Onde :

$P_{cr}$  = carga de fissuração

$P_m$  = carga máxima

$P_{mo}$  = carga máxima pós-pico

Observa-se que a carga máxima atingida pós-pico não supera a carga de pico, ou seja  $P_{mo} < P_m$ . Para alguns compósitos o ganho de resistência após a redistribuição de tensões é mais significativo, e a carga máxima resistida pela viga é maior que a carga de pico. Este comportamento, com  $P_{mo} > P_m$ , é comum para compósitos reforçados com grande quantidade de fibras, ou com fibras longas e alinhadas, mesmo quando se utiliza fibra de baixo módulo como o sisal (TOLEDO FILHO *et al*, 2002).

Além da determinação da resistência à flexão, a partir do diagrama carga-deslocamento, outro fator importante também é a tenacidade dos compósitos. A tenacidade é importante característica para os materiais de compósitos constituídos de fibras naturais, onde um dos principais papéis desempenhados pelas fibras é

prover tenacidade às matrizes frágeis (TOLEDO FILHO *et al.*, 2002 ). Contudo para determinar a curva-deflexão completa do ensaio de flexão, algumas variáveis devem ser consideradas como: tamanho do corpo de prova; configuração da carga; tipo de controle (carga, deflexão no ponto de carga, deslocamento do travessão, taxa de carregamento do ensaio, instrumentos utilizados para medição da deflexão e outros). A norma utilizada para a medida de tenacidade dos compósitos é a ASTM C1018 (1992).

## 2.8 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

A fractografia é uma das principais técnicas utilizadas no processo de análise de materiais após a falha. Consiste em identificar aspectos fractográficos e estabelecer as relações entre a presença ou ausência desses aspectos com a seqüência de eventos da fratura podendo levar à determinação do carregamento e das condições dos esforços no momento da falha (SOHN; HU, 1995). A fractografia é a chave para se determinar a seqüência dos eventos ocorridos durante o processo de fratura e identificar o estado de tensões atuantes no momento da falha. Outros fatores como condições ambientais e defeitos do material podem contribuir para o início do crescimento da fratura e também podem ser avaliados por esta técnica (FRANCO, 2003).

O conhecimento da microestrutura, paralelamente ao do comportamento mecânico, tem a finalidade de fornecer subsídios aos projetos de materiais estruturais, para que eles atinjam o melhor desempenho possível em suas diferentes aplicações. Obtendo, desse modo, a resposta para a influência causada pelo tipo de fibra, pelo conteúdo da mesma e pela adesão interfacial fibra/matriz e como esses fatores devem ser corretamente definidos, para uma escolha racional do compósito a ser empregado na prática (ANDRADE, 2007).

A análise micro estrutural é empregada para interpretar propriedades dos materiais polifásicos, a partir de sua estrutura.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Fibra de Sisal

Neste trabalho utilizou-se fibra de sisal (*Agave sisalana*), encontrada no comércio de Belém, oriunda da Bahia.

A pesquisa foi realizada com fibras de sisal secas e curtas, com comprimentos de, 15,0 mm e 25,0 mm (TOLEDO FILHO et al,1997) e teor de fibra 1% em peso definidos com base em de G. RAMAKRISHNA et al, 2005 e 2,22% em fração volumétrica. O procedimento para a obtenção do comprimento desejado foi através do corte manual (com tesoura) a partir do feixe de fibras. A Figura 9 mostra a fibra in natura, a Figura 10 (a) mostra a fibra cortada com 15,0 mm de comprimento e a Figura 10 (b) mostra a fibra cortada com 25,0 mm de comprimento.



Figura 9 - Fibra de sisal in natura



Figura 10 (a) - Fibra de sisal com 15,0 mm de comprimento



Figura 10 (b) - Fibra de sisal com 25,0 mm

### 3.1.2 Cimento

Para a obtenção da argamassa foi utilizada uma mistura de cimento, areia e água. O cimento utilizado para o trabalho foi o CII 32, onde suas caracterizações físico-químicas estão representadas na Tabela 4 recomendada pelo fabricante.

Tabela 4 . Caracterização do cimento fornecido pelo fabricante

**Fonte: ITACIMPASA-(LABORATÓRIO CERTIFICADO DE QUALIDADE Nº 296/09)**

Material Declarado: Cimento Portland Composto com Pozolona		Marca: NASSAU Tipo: CP II-Z-32					
COMPOSIÇÃO QUÍMICA							
ENSAIO	UNIDADE	RESULTADOS %	Limites da Norma NBR 1158/1991				
Perda ao Fogo PF	%	5,86	≤ 6,5%				
Dióxido de Silício-SiO <sub>2</sub>	%	24,31	Não aplicável				
Óxido de Alumínio- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	6,24	Não aplicável				
Óxido de Ferro- Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,99	Não aplicável				
Óxido de Cálcio-CaO	%	53,78	Não aplicável				
Óxido de Magnésio- MgO	%	1,61	≤ 6,5%				
Anidrido Sulfúrico- SO <sub>3</sub>	%	2,98	≤ 4,0%				
Óxido de Sódio- Na <sub>2</sub> O	%	0,20	Não aplicável				
Óxido de Potássio- K <sub>2</sub> O	%	0,8	Não aplicável				
Resíduo Insolúvel-R.I.	%	13,48	≤ 16,0%				
Óxido de Cálcio Livre-CaO Livre	%	0,73	Não aplicável				
Anidrido Carbônico	%	4,51	≤ 5,0%				
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA							
Finura-Resíduo na peneira 75 μ m			≤ 12%				
Finura-Resíduo na peneira 325 mesh			Não aplicável				
Massa Específica Real			Não aplicável				
Área Específica -Blaine			≥ 2600 cm <sup>2</sup> / g				
Água da Pasta de Consistência Normal			Não aplicável				
Tempo do início da pega-Blaine			≥ 1h				
Água da pasta de Consistência Normal			≤ 10 h				
Tempo de início da Pega			≤ 5,0 mm				
Tempo de fim de Pega(Facultativo)							
Expansibilidade à Quente							
Resistência À Compressão(MPa)-(NBR 7215/1996)							
Idade (dias)	Corpo -de -prova nº				Média	Desvio Máximo(%)	Limites da Norma NBR 11578/1991
	1	2	3	4			
1	15.700	15.521	15.383	**	15,5	1,1	Não aplicável
3	24,153	23.988	24.368	24.267	24,2	0,9	≥ 10 Mpa
7	28.089	28.152	28.314	28.499	28,3	0,8	≥ 20Mpa
28	35.651	35.881	35.681	35.713	35,8	0,4	≥ 32MPa

Observação relativa a amostra

Equivalente Alcalino em Na<sub>2</sub> O(0,658x K O% 0,73%

**ITAITUBA INDÚSTRIA DE CIMENTO DO PARÁ S/A-ITACIMPASA**

Utilizou-se o cimento Portland CP II- Z-32 NB 11578 composto por silicato de cálcio, aluminato de cálcio, ferro, aluminato de cálcio, sulfato de cálcio, filler carbonático e pozalona, adquirido no mercado da Grande Belém (Figura 11).

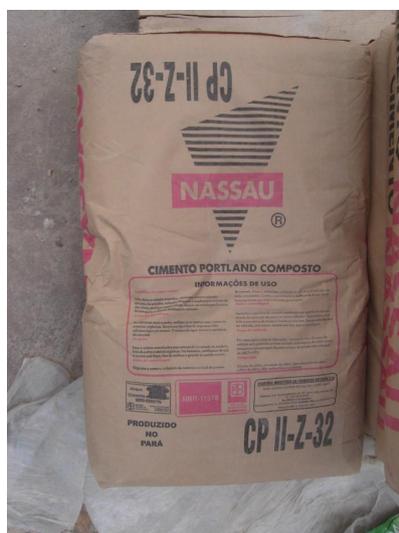


Figura 11 - Cimento CII-Z 32

### 3.1.3 Areia

A areia normal brasileira é um material de referência utilizado por todos os laboratórios nacionais que realizam ensaios físicos-mecânicos de cimento Portland, seja no controle de processo de produção dos fabricantes de cimentos Portland, seja pelos laboratórios de materiais de construção civil em geral. A exigência do uso da areia normal brasileira como material de referência está estabelecida na norma ABNT NBR 7215: 1996

A produção da areia normal brasileira demanda controles específicos de materiais e de processos, envolvendo ensaios que demandam capacitação técnica e laboratorial e envolvem áreas multidisciplinares relacionadas à prospecção geológica, mineralogia e tecnologia de produção de materiais de construção civil. A produção e fornecimento deste material são atribuições do IPT desde 1982, conforme estabelecido na ABNT NBR 7214: 1982 - Areia normal para ensaio de cimento.

Este material é fornecido em embalagens de 25 kg, separadas nas seguintes frações granulométricas: grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100). (IPT- Contenco). Na Figura 14 a Areia embalada com 25Kg.

O agregado utilizado no traço é uma Areia Normal Brasileira que foi doação do Laboratório de Construção Civil do IFPA, onde se encontrava pré - selecionada e classificada nas peneiras nº 16, 30, 50 e 100, seguindo a NBR 7214. A utilização da areia padronizada economizou tempo no preparo das argamassas, garantindo assim a eliminação de uma variável. Figura 12(a) e (b).



**Figura 12(a) - Areia Normal Brasileira, areia embalada**



**Figura 12(b) - Aspecto visual da Areia Normal Brasileira**

### 3.1.4 Água

Foi utilizada água potável da rede pública

## 3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Caracterização da Fibra de Sisal

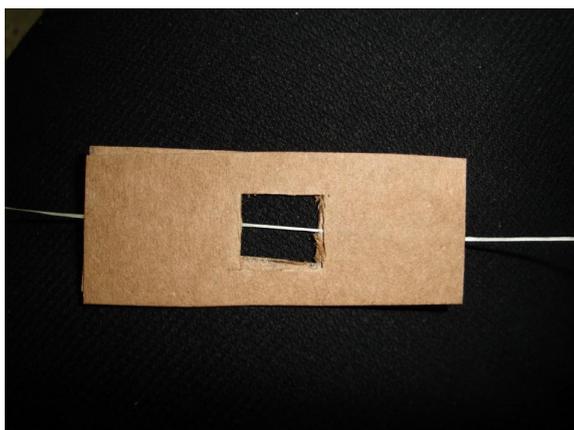
Na caracterização da Fibra de Sisal foram analisadas: resistência à tração, diâmetro médio, alongamento, aspecto superficial, absorção de água e massa específica. O ensaio de resistência à tração foi realizado na máquina DL-500 EMIC do laboratório de Eco-compósito de Engenharia Mecânica da UFPa.

Cada corpo de prova de fibra foi colocado em suporte de papel Kraft 180g, identificado como TAB (AGOPYAN *et al.* 2007). Foram utilizados TABs com as seguintes dimensões: base do papel 65x25,0 mm, dimensões da janela 15x15,0 mm.

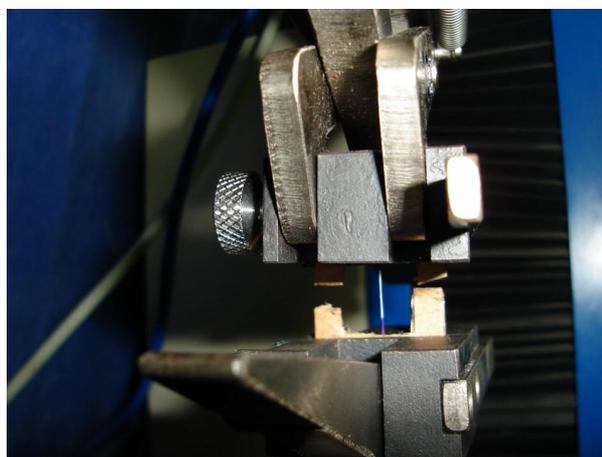
Os TABs são usados para proteger as fibras dos danos na ocasião do posicionamento das garras na máquina e para distribuir de maneira uniforme a carga aplicada (FAGURY . 2005).

Foram realizados ensaios com 10 amostras de fibras com comprimento útil de 15,0 mm. A velocidade de ensaio foi de 0,5 mm/min.

A Figura 13 ilustra a fibra no suporte de papel preparada para o ensaio de tração e a Figura 14, a fibra sendo tracionada.



**Figura 13 - A fibra no suporte de papel preparada para o ensaio de tração**



**Figura 14 - Fibra sendo tracionada**

A análise da microestrutura das fibras foi realizada no MEV onde foi verificado o aspecto superficial com as fibras in natura. A massa específica da fibra de sisal foi determinada utilizando-se o Picnômetro do Laboratório de Química do IFPa.

## **3.2.2 Caracterização da Argamassa de Cimento**

### **3.2.2.1 Cimento**

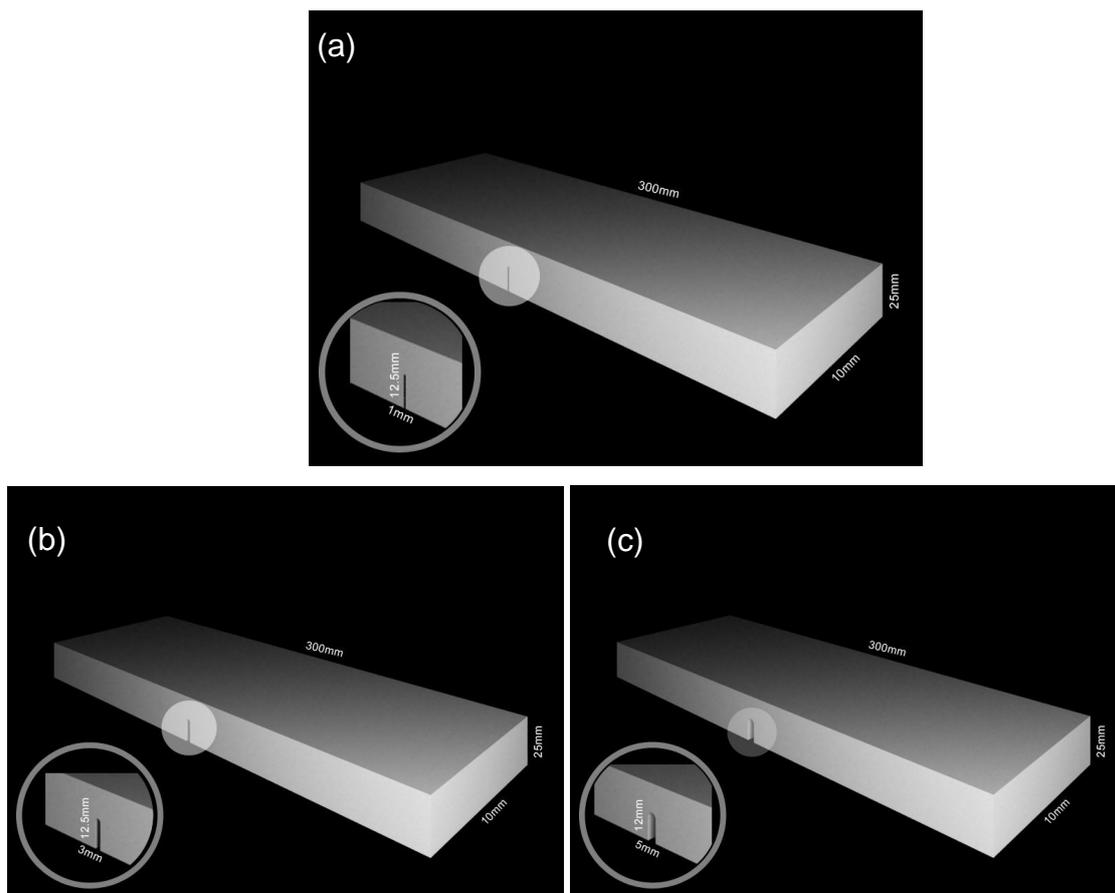
A argamassa de cimento foi caracterizada no Laboratório de Caracterização dos Materiais da Coordenação de Metalurgia do IFPA.

### **3.2.2.2 Areia**

A areia utilizada foi a Areia Normal Brasileira, com dados do fabricante.

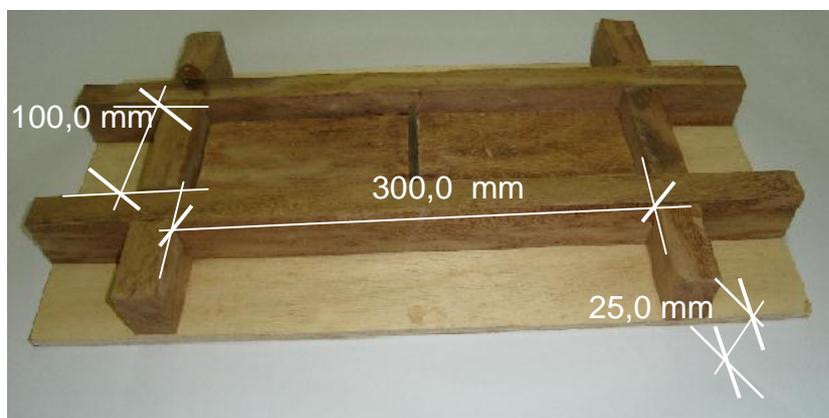
## **3.2.3 Fabricação dos moldes de Corpo de Prova com entalhe pré-definido**

Os moldes dos corpos de prova para ensaio de flexão em três pontos, foram confeccionados em madeira, cuja base apresenta um corte, o qual serve de apoio para o entalhe. O layout do molde segundo FUJIYAMA (1997) possui dimensões de seção transversal retangular 100 mm x 25,0 mm x 300 mm de comprimento obedecendo a norma RILEM 49. Utilizou-se entalhe em acrílico correspondendo a 50% da altura do molde. O entalhe selecionado foi reto com uma das pontas arredondada e foram definidos os valores das espessuras de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm, apresentados esquematicamente na Figura 15 (a), (b) e (c). Na Figura 16 o molde do corpo de prova em madeira.



**Figura 15 - Esquema dos entalhes**

Os moldes de madeira utilizados neste trabalho são compostos por quatro laterais e o fundo, sendo que o entalhe de acrílico foi colocado no fundo do molde. As laterais são encaixadas e ajustadas para receber a mistura. Para facilitar a desforma aplicou-se vaselina industrial nas paredes internas do molde inclusive no acrílico.



**Figura 16- Molde do corpo de prova em madeira**

### 3.2.4 Confeção dos Corpos de Prova

#### 3.2.4.1 Fabricação dos corpos de prova da matriz pura

Os corpos de prova foram confeccionados em ambiente predial em fase de construção com área de 250 m<sup>2</sup> e vãos externos sem elementos de vedação (Figura 17). Para a primeira etapa da pesquisa foram produzidos 42 corpos de prova utilizando-se areia comercial do Km 28 de Castanhal sem normatização. Devido à quebra de 22 corpos de prova durante a sua confecção, substituiu-se a areia comercial pela Areia Normal Brasileira na confecção de novos corpos de prova para a etapa seguinte da pesquisa.

A fração de cada constituinte da argamassa foi determinada através de dados experimentais baseando-se em parâmetros encontrados na literatura, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 . Relação cimento e areia

Relação cimento e areia	Autores
1:1,5	SAVASTANO, 2000
1:1	SILVA, 2004
1:2	SARMIENTO <i>et al</i> , 1996

Adotou-se o critério SARMIENTO *et al.* (1996) na proporção de 1:2 (cimento:areia), traço este que foi usado em todos os processos.

O fator água/cimento usado experimentalmente, foi o traço de 0,5 quantidade de água para 1,0 quantidade de cimento em peso, conforme SEDAN *et al.* 2007.



**Figura 17- Ambiente predial**

Para os ensaios de flexão em três pontos, foram moldados dezoito corpos de prova da matriz de argamassa de cimento, sendo seis com entalhe de 1,7 mm, seis com entalhe de 3,0 mm e seis com entalhe de 5,0 mm.

Os materiais constituintes da mistura, antes de serem moldados, foram identificados e pesados de acordo com os dados da Tabela 6, onde foi representado um corpo de prova para cada entalhe. Aplicou-se o desmoldante e umedeceu-se os moldes. Em seguida, de posse de todos os materiais foi iniciada sua mistura.

Tabela 6 - Identificação e pesagem dos constituintes da argamassa com os três tipos de entalhe

Corpo de Prova			Peso(g)	
Identificação	Entalhe	Cimento	Areia	Água
CP	1,7 mm	600	1200	300
CP	3,0 mm	600	1200	300
CP	5,0 mm	600	1200	300

O processo para a obtenção da argamassa foi através de mistura manual. Colocou-se 600g de cimento em um recipiente acrescentando-se água, que foi misturada por 1 minuto e 30 segundos. Adicionou-se areia à pasta de cimento misturando-se por 2 minutos. A argamassa ficou em repouso por 1 minuto para então ser colocada nos moldes, adensando-se manualmente até atingir sua borda. Para melhor adensamento utilizou-se um vibrador de imersão como mostra a Figura 18.

A vibração na mistura foi realizada por 1 minuto, em seguida fez-se um alisamento manual da superfície para após colocar-se em câmara úmida por 48 horas. Os corpos de prova foram desmoldados e imersos em água por período de 28 dias que é o tempo estabelecido para a cura completa de material cimentício. A Figura 19 mostra o corpo de prova durante a vibração.



**Figura 18 - Vibrador de Imersão**



**Figura 19 - Corpo de prova durante a vibração**

Os materiais constituintes da mistura antes de serem moldados, foram identificados e pesados de acordo com os dados da Tabela 6, acrescentando 1% (G. RAMAKRISHNA et al, 2005) em peso de fibra do peso total do corpo de prova ou 2,22% em fração volumétrica da fibra. As fibras foram cortadas com comprimentos de 15,0mm e 25,0 mm selecionados a partir de pesquisas realizadas por TOLEDO FILHO, 1997 que estudou a influência do comprimento das fibras de sisal de 15,0 mm e 25,0 mm na resistência a compressão da argamassa.

Para os ensaios de flexão em três pontos, foram moldados no total 36 amostras do compósito, sendo dezoito compósitos com comprimento da fibra de 15,0 mm divididos do seguinte modo: seis com entalhe de 1,7 mm, seis com entalhe de 3,0 mm e seis com entalhe de 5,0 mm e dezoito compósitos com comprimento da fibra de 25,0 mm separados por tipo de entalhe, sendo: seis com entalhe de 1,7 mm, seis com entalhe de 3,0 mm e seis com entalhe de 5,0 mm.

### 3.2.4.2 Fabricação dos corpos de prova de materiais compósitos

A obtenção dos corpos de prova do compósito está de acordo com o fluxograma da Figura 20

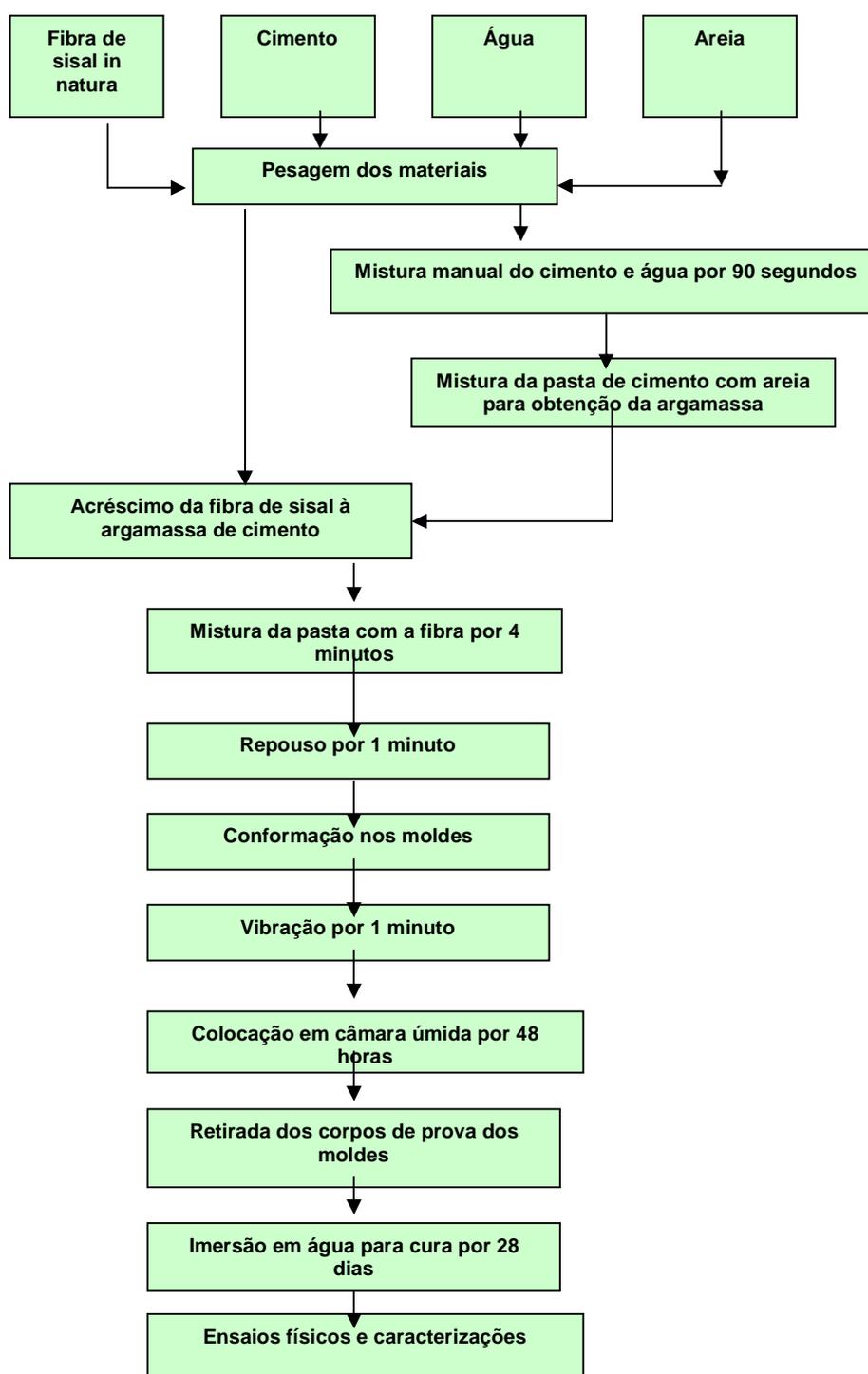


Figura 20 - Obtenção dos corpos de prova matriz pura e compósito

Aplicou-se o desmoldante e umedeceu-se os moldes. Em seguida de posse de todos os materiais foi iniciada sua mistura, colocou-se o cimento pesado num recipiente, acrescentando água que foi misturada manualmente por 1 minuto e 30 segundos, adicionou-se areia à pasta de cimento misturando-se por 2 minutos. A argamassa ficou em repouso por 1 minuto e em seguida acrescentou-se a fibra que foi misturada por 4 minutos. A mistura é deixada em repouso por 1 minuto antes da conformação. A Figura 21 mostra a aplicação do desmoldante no molde que foi utilizado para facilitar a desforma.



**Figura 21 - Aplicação do desmoldante no molde**

O compósito é moldado manualmente até atingir a borda do molde. Para o adensamento, utilizou-se um vibrador de imersão fazendo então a vibração no corpo de prova por 1 minuto, em seguida fez-se um alisamento manual da superfície. Após este procedimento os corpos de prova permaneceram 48 horas em câmara úmida para depois serem desmoldados e imersos em água. A Figura 22 apresenta as fibras que foram cortadas em dimensões de 25,0 mm adicionadas a mistura de argamassa de cimento e o compósito.



**Figura 22- A fibra sendo adicionada a mistura da argamassa de cimento**

#### 3.2.4.3 Procedimento de cura dos corpos de prova de matriz pura e materiais compósitos

Os corpos de prova permaneceram em câmara úmida por quarenta e oito horas como se pode observar na Figura 23, em seguida desmoldados, ficando imersos em água. Normalmente os corpos de prova são ensaiados em tempo de cura múltiplos de sete dias. Para este trabalho o tempo de cura foi de vinte e oito dias. Neste trabalho determinou-se experimentalmente as características mecânicas do compósito com entalhe pré-definido de matriz cimentícia. O tipo de ensaio realizado para caracterização do material foi de flexão em três pontos, seguindo as recomendações da norma RILEM 49.



**Figura 23 - Câmara úmida**

A Figura 24 mostra os corpos de prova mergulhados na água, de onde foram retirados após a cura.



**Figura 24 - Corpos de prova imersos na água**

. A Figura 25 mostra a regularização das faces. Houve necessidade de fazer regularização das faces para que elas ficassem niveladas e sem rebarbas adquiridas na fabricação do material.



**Figura 25 - Regularização das faces das amostras**

### **3.2.5 Ensaio de Flexão dos Corpos de Prova com entalhe pré-definido**

Os ensaios foram realizados com 54 corpos de prova em máquina de ensaio Universal modelo DL-500 da EMIC, pertencente ao Laboratório de Eco-compósito do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPA, de acordo com a norma ASTM D638-90 como mostra a Figura 26. O ensaio foi realizado à temperatura ambiente com velocidade de 0,5 mm/min.



Figura 26 É Máquina de ensaio universal

### 3.2.6 Análise da superfície de fratura

A superfície de fratura e o mecanismo de falha das amostras fabricadas foram analisados depois de realização dos ensaios de flexão em três pontos. A morfologia da superfície de fratura foi analisada pelo O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) que é uma técnica bastante utilizada na análise do mecanismo de fratura em Compósito Cimentício. As análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura . LABMEV do Instituto de Geociências da UFPA. O equipamento utilizado foi um MEV modelo LEO-1430. As amostras foram metalizadas com platina e o tempo de recobrimento foi de 2,0 minutos As condições de análises para as imagens de elétrons secundários foram: corrente do feixe de elétrons = 90  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante = 10 kv, distância de trabalho = 15-12 mm. A Figura 27 (a) e (b) mostra a imagem do MEV e das amostras para serem analisadas.



Figura 27 (a) - Imagem do MEV



Figura 27 (b) - Imagem das amostras analisadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE SISAL

As fibras de sisal foram caracterizadas quanto ao aspecto superficial, diâmetro médio, resistência à tração, alongamento, massa específica e módulo de elasticidade. As fibras foram utilizadas como recebidas, sem tratamento.

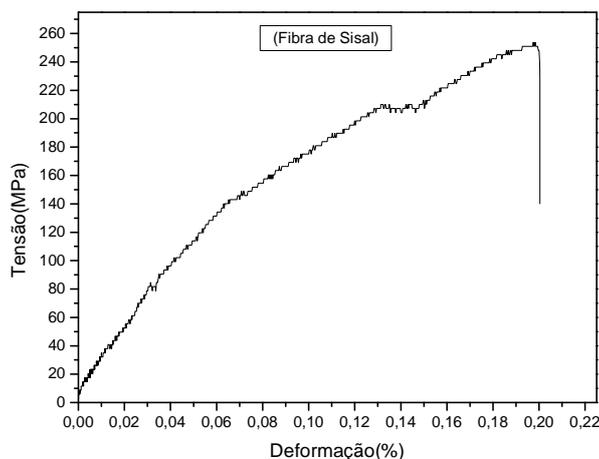
Verificou-se que os resultados de resistência à tração e alongamento das fibras, mostrados na Tabela 7, estão dentro da média alcançada por outros pesquisadores. Constatou-se que o limite de resistência à tração ficou superior a TOLEDO FILHO (1997); GUIMARÃES (1987) e inferior a CHAND et al (1988); SAVASTANO E AGOPYAN(1998); AZIZ et al (1984).

Tabela 7 - Caracterização das fibras de sisal não tratadas

Reforço	Diâmetro( $\mu$ m)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade(GPa)	Alongamento(mm)
	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)	Média (DP)
Fibra de sisal	274,80 ( $\pm$ 42,96)	251,84 ( $\pm$ 31,37)	5,15 ( $\pm$ 0,19)	1,75 ( $\pm$ 0,26)

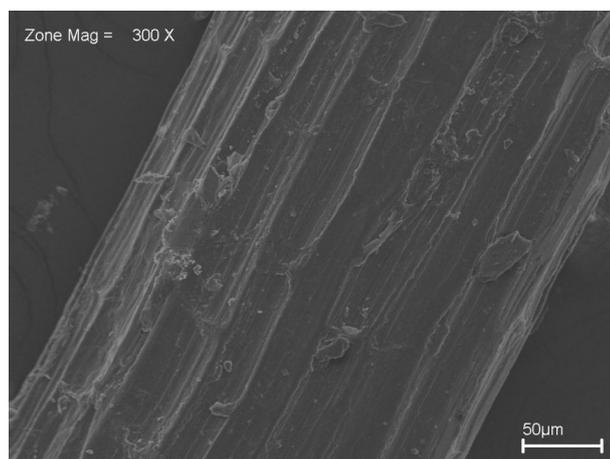
A análise micro estrutural das fibras foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) a partir das fibras in natura.

Para a obtenção dos dados das propriedades das fibras admitiu-se que suas seções, apresentavam-se em forma circular, como constatado por (RODRIGUES, 2008). A Figura 28 apresenta o diagrama típico tensão x deformação do Ensaio de Tração da fibra de sisal.



**Figura 28- Diagrama típico tensão x deformação do Ensaio de Tração da fibra de sisal.**

A Figura 29 ilustra a superfície longitudinal da fibra de sisal sem tratamento, que apresenta superfície irregular e onde se nota que a superfície está recoberta pelas células de parênquima e pelos resíduos provenientes do processo de beneficiamento das fibras, como observado por (MARTINS et al, 2004).



**Figura 29 - Superfície longitudinal da fibra de sisal sem tratamento**

A massa específica do sisal foi obtida no Laboratório de Química do IFPA utilizando-se o Picnômetro e Balança Modelo AY220 máxima 220g e mínima 0,01g conforme a Figura 30.



**Figura 30 - Balança e Picnômetro**

Foram analisadas 14 amostras de fibra onde o resultado da média da massa específica foi de 1,2591 g/cm<sup>3</sup>.

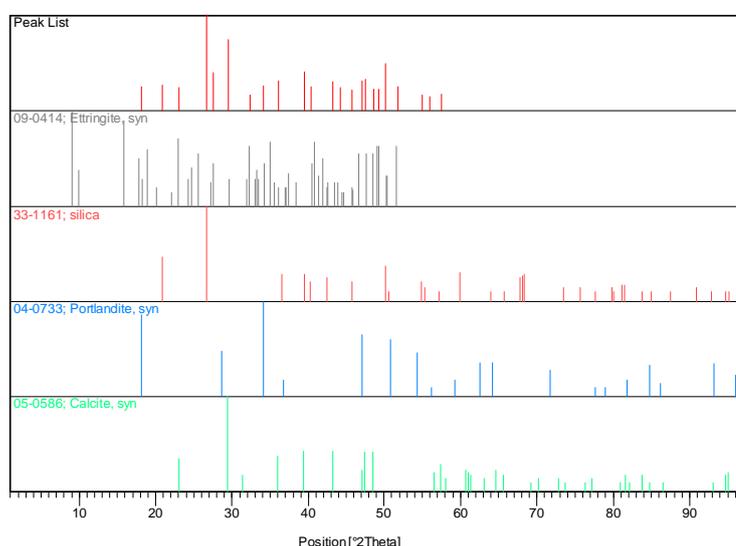
Observou-se que este resultado está compatível com a média dos resultados obtidos pelos pesquisadores citados na Tabela 2.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO

A análise de amostras da argamassa foram caracterizadas por Difração de Raios-X, método do pó, (DRX) em amostra total. Utilizou-se um difratômetro de raios-X da marca PHILIPS PW 1730, com Goniômetro PW 1050, foco normal, e com tubo de raios-X de anodo de Cu. A aquisição de dados dos registros foi obtida através de uma interfase e software, e o tratamento dos dados com o software APD, Automated Powder Diffraction. As análises por DRX mostram a identificação de fases, isto é, os componentes dentro do material. Os difratogramas mostram fases presentes nas amostras que sintetizadas foram: sílica, portlandita, "calcita" e picos que sugerem que seja da etringita. Comparando a composição química do cimento fornecida pelo fabricante com os dados do DRX o CaO é predominante, pois ocorre na portlandita, calcita, seguido do SiO<sub>2</sub> que ocorre na fase sílica. A etringita está representada no gráfico na cor preta, a sílica em vermelho, a portlandita em azul e a calcita em verde. A cura das amostras foi por imersão em água por 28 dias.

METHA & MONTEIRO, 1994 diz que a fase do silicato é considerada a principal responsável pela resistência mecânica nas primeiras idades de hidratação. TAYLOR, 1990 afirma que a portlandita contribui pouco para a resistência da pasta

de cimento endurecida. Segundo METHA & MONTEIRO, 1994 a etringita é responsável pelo fenômeno da pega e desenvolvimento da resistência inicial. Esta fase (etringita) nas idades iniciais, a expansão pode acontecer sem dano ao compósito, porém se a hidratação continuar na pasta já endurecida gera tensões internas provocando fissuras e cavidades, e como conseqüência a deteriorização do concreto. Na caracterização da pasta deste trabalho notou-se presença de picos de etringita sugerindo a presença de fissuras no mesmo. O cimento utilizado, CP II-32 e a areia foi a Areia Normal Brasileira. A Figura 31 ilustra a análise do Raios-X.



**Figura 31 - Análise no Raios-X da amostra de argamassa de cimento, mostrando as fases encontradas na argamassa**

### 4.3 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

No início do processo para obtenção da matriz pura com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm, onde foram confeccionados quarenta e dois corpos de prova da matriz de argamassa de cimento, sendo dezoito da matriz de cimento com entalhe de 5,0 mm; dezesseis da matriz de cimento com entalhe de 3,0 mm e oito da matriz de cimento com entalhe de 1,7 mm. Ao serem desmoldados, houve quebra de vinte e dois corpos de prova, sendo que seis deles apresentaram trinca de retração

imediatamente após o término do processo de vibração, antes do desmolde. A Figura 32 mostra um corpo de prova com trinca na região mediana.



**Figura 32 - Matriz com trinca na região mediana**

SALES et al. 2004 afirmam que a retração plástica em materiais cimentícios ocorrem em consequência de fatores como elevadas temperatura ou velocidade do vento.

Analisou-se então alguns fatores que poderiam ter causado a retração. A areia utilizada para os primeiros 22 corpos que quebraram foi areia comercial, o ambiente muito ventilado, tendo uma perda muito rápida de água, a temperatura média 32° e umidade relativa do ar em Belém um pouco abaixo do normal que na época da confecção das amostras foi de 68,8% (INMET-2010).

Na tentativa de solucionar o problema ocorrido anteriormente, foram providenciados alguns procedimentos como: imediatamente após a moldagem os corpos de prova foram colocados em câmara úmida vedando-se a entrada do vento durante o processo de fabricação (SALES et al, 2004).

Utilizando-se Areia Normal Brasileira 7214 e considerando-se os fatores causadores da retração responsáveis pelas trincas de retração, as amostras da matriz pura de argamassa de cimento com entalhe que foram novamente moldadas não apresentaram os problemas anteriores.

Com o domínio do processo de fabricação iniciou-se a produção dos corpos de prova de matriz pura e compósitos com comprimento de fibras de 15,0 mm e 25,0 mm e entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura. A Figura 33 ilustra (a) corpos de prova de matriz pura e trincas pré definidas de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm, (b) corpos de prova de reforçados com fibras de 15,0 mm de comprimento e trincas

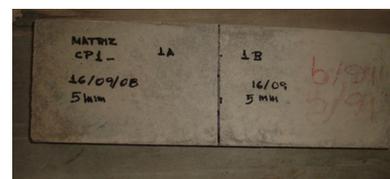
de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura e (c) corpos de prova reforçados com fibras de 25, 0 mm de comprimento e trincas de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura. Os corpos de prova foram produzidos isentos de defeito de fabricação.



**Matriz pura 1,7 mm**



**Matriz pura 3,0 mm**



**Matriz pura 5,0 mm**

(a)



**Compósito com entalhe 1,7 mm, comprimento da fibra 15,0 mm**

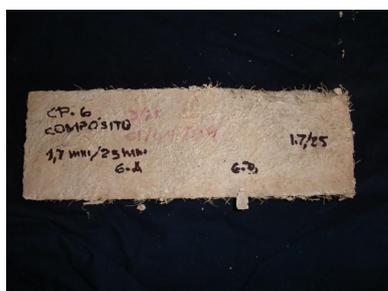


**Compósito com entalhe 3,0 mm, comprimento da fibra 15,0 mm**

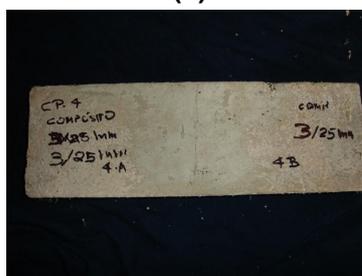


**Compósito com entalhe 5,0 mm, e comprimento da fibra 15,0 mm**

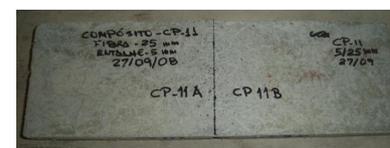
(b)



**Compósito com entalhe 1,7 mm, comprimento da fibra 25,0 mm**



**Compósito com entalhe 3,0 mm, comprimento da fibra 25,0 mm**



**Compósito com entalhe 5,0 mm, e comprimento da fibra 25,0 mm**

(c)

**Figura 33** É Corpos de prova de matriz e compósito com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm

#### 4.4 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS COM ENTALHE PRÉ-DEFINIDO E FRACTOGRAFIAS DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA

As propriedades mecânicas dos compósitos foram caracterizadas através do ensaio de flexão de três pontos. De posse dos valores carga e deformação obtidos

experimentalmente foram traçados gráficos para analisar o comportamento à flexão dos materiais obtidos na pesquisa, tanto a matriz como o compósito.

Os corpos de prova fabricados da matriz pura e dos compósitos foram ensaiados à flexão seguindo os procedimentos da norma RILEM 49. Foram realizados ensaios em cinquenta e quatro amostras dos quais trinta e seis compósitos e dezoito de matriz pura. Os ensaios foram realizados em máquina de Ensaio Universal modelo DL-500 da EMIC, pertencente ao Laboratório de Eco-Compósito do Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA (Figura 34), de acordo com a norma ASTM D638-90. Neste ensaio os corpos de prova foram posicionados de modo que o carregamento seja aplicado no meio do vão, utilizando-se uma velocidade 0,5mm/s, RILEM 49. Os resultados que o equipamento fornece são obtidos através do sistema de aquisição de sinal.

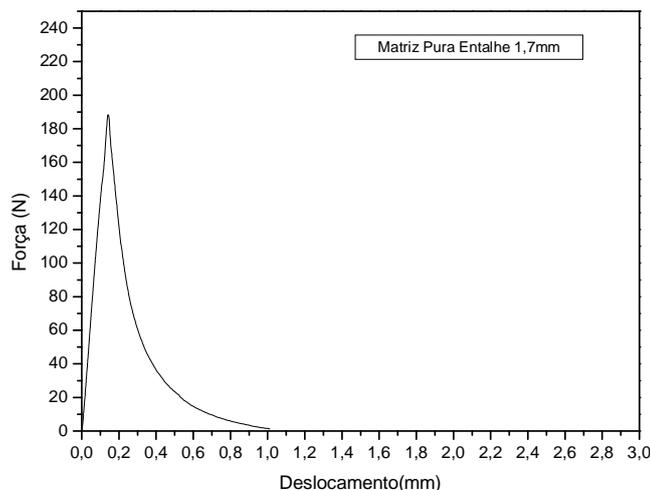


**Figura 34** É Corpo de prova com entalhe de 3,0 mm no ensaio de Flexão em Três Pontos

#### **4.4.1 Corpos de prova da matriz pura**

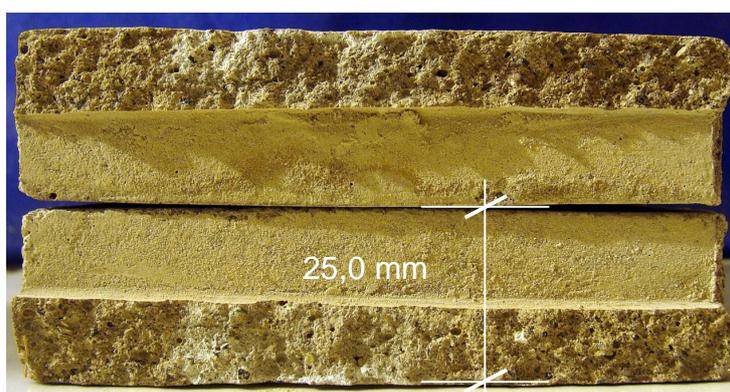
##### **4.4.1.1 Corpos de prova da matriz pura com entalhe de 1,7 mm**

Foram realizados ensaios de flexão com seis amostras para cada tipo de entalhe. O gráfico da Figura 35 ilustra o comportamento carga x deslocamento típico da série dos corpos de prova da matriz pura e com entalhe de 1,7 mm de comprimento. A carga inicia e cresce de modo estável rompendo abruptamente.



**Figura 35 - Diagrama carga x deslocamento do corpo de prova da matriz pura e entalhe de 1,7 mm de espessura**

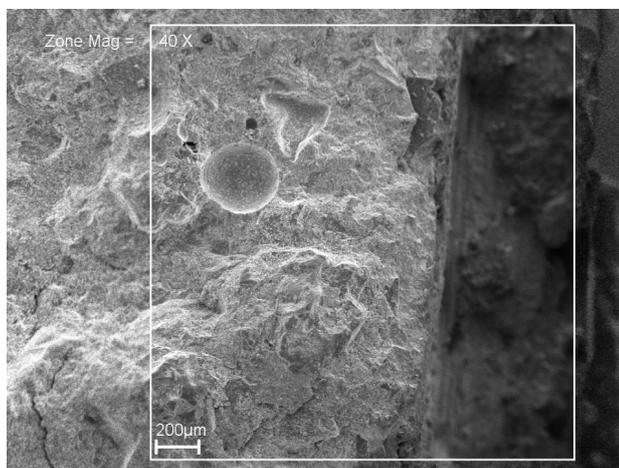
A Figura 36 mostra a superfície dividida em duas partes, sendo uma lisa, que representa a superfície do entalhe e a outra rugosa, que representa a superfície de fratura. Esta superfície de fratura apresenta aspecto rugoso e com a presença de vazios e porosidades.



**Figura 36 É Matriz pura com entalhe 1,7 mm após o ensaio de Flexão em Três Pontos**

A Figura 37 mostra a micrografia eletrônica de varredura da superfície de fratura da matriz pura após ensaio de flexão. Nesta imagem é possível observar com maior detalhamento o aspecto rugoso e a presença de vazios e porosidades. Esses

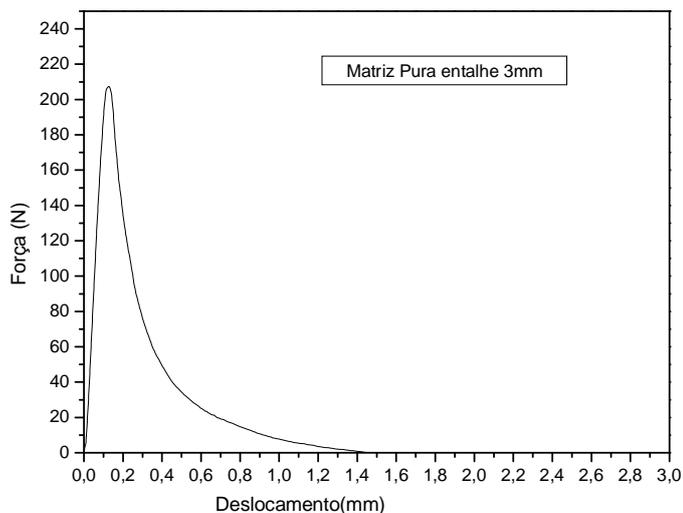
vazios e porosidades são oriundos do processo de fabricação pela retenção do ar gerado durante o uso do vibrador de imersão.



**Figura 37- Micrografia eletrônica de varredura da matriz pura**

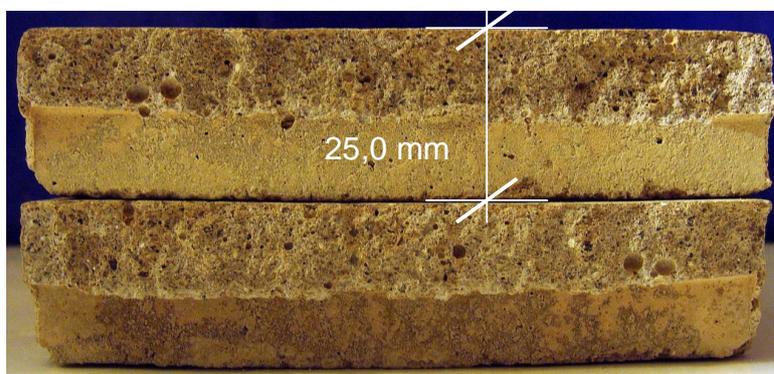
#### 4.4.1.2 Corpos de prova da matriz pura com entalhe de 3,0 mm

Nas amostras sem fibras foram realizados seis ensaios para o entalhe de 3,0 mm. A Figura 36 mostra o diagrama para carga x deslocamento do corpo de prova com entalhe de 3,0 mm sem reforço. O gráfico da Figura 38 é ilustrativo do comportamento típico dos ensaios efetuados para este tipo de corpo de prova. A curva descreve comportamento semelhante ao apresentado pelos corpos de prova com entalhe de 1,7 mm de espessura, ou seja, com o aumento da carga a curva cresce e apresenta crescimento linear elástico até a carga máxima e então acontece um decaimento brusco.



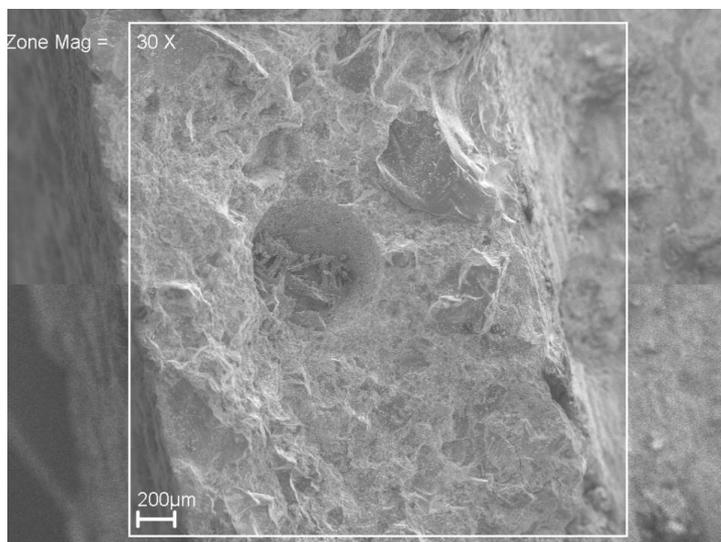
**Figura 38 - Curva da matriz pura com 3,0 mm de entalhe**

A Figura 39 mostra a imagem do corpo de prova com entalhe de 3,0 mm após o ensaio de flexão em três pontos. Nesta imagem pode-se observar a presença de porosidade da amostra.



**Figura 39- Imagem do corpo de prova da matriz pura com entalhe de 3,0 mm após ensaio de Flexão em Três Pontos**

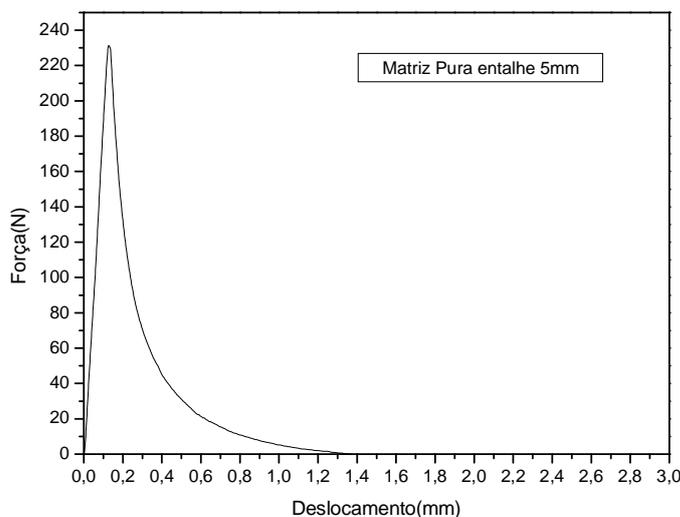
A Figura 40 mostra a fractografia da matriz com entalhe de 3,0 mm onde se observa na microestrutura da argamassa de cimento a presença de porosidade e defeitos. Sendo esses defeitos originados no processo de fabricação conforme descrito 4.4.1.1 para os corpos de prova com entalhe de 1,7 mm de espessura.



**Figura 40** É Microestrutura da matriz pura com entalhe de 3,0 mm mostrando porosidade e defeitos

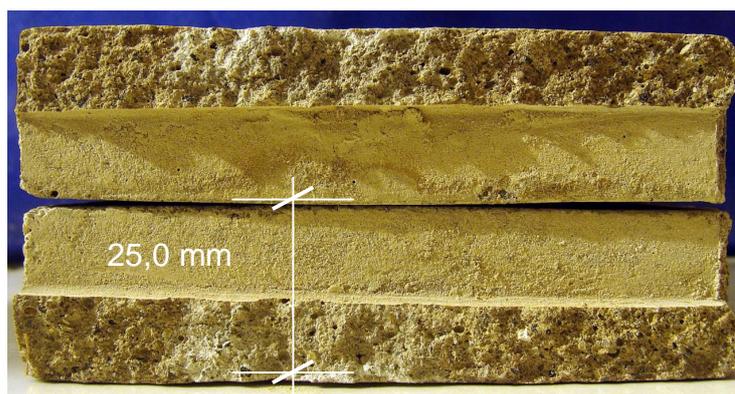
#### 4.4.1.3 Corpos de prova da matriz pura com entalhe de 5,0 mm

Foram ensaiadas seis amostras com entalhe de 5,0 mm. A Figura 41 mostra uma curva carga x deslocamento, típica de materiais frágeis, das amostras ensaiadas. O diagrama é resultado típico da série com entalhe de 5,0 mm, que também apresenta características semelhantes as curvas obtidas para entalhes de 1,7 mm e 3,0 mm de espessura, variando a carga máxima e deformação máxima atingidos para cada tipo de entalhe.



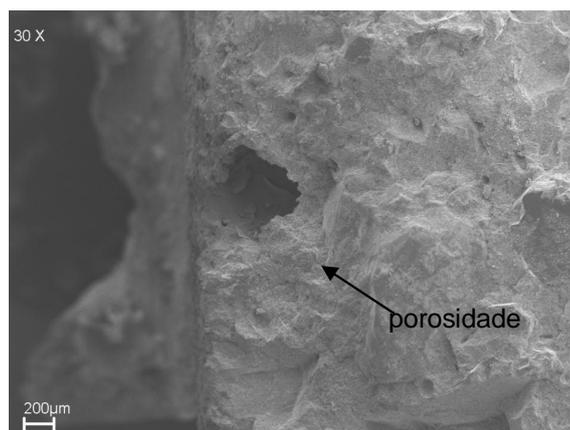
**Figura 41 - Diagrama carga x deslocamento da matriz pura com entalhe 5,0 mm**

A Figura 42 ilustra a superfície de fratura para a matriz sem reforço com entalhe de 5,0 mm após o ensaio de flexão em três pontos. A imagem mostra o aspecto da superfície de fratura onde também é observado o aspecto rugoso e a presença de vazios e porosidades.



**Figura 42- Matriz pura com entalhe de 5,0 mm após a fratura**

A micro estrutura da argamassa de cimento, onde se observa porosidade na matriz sem reforço com entalhe de 5 mm é mostrada Figura 43.

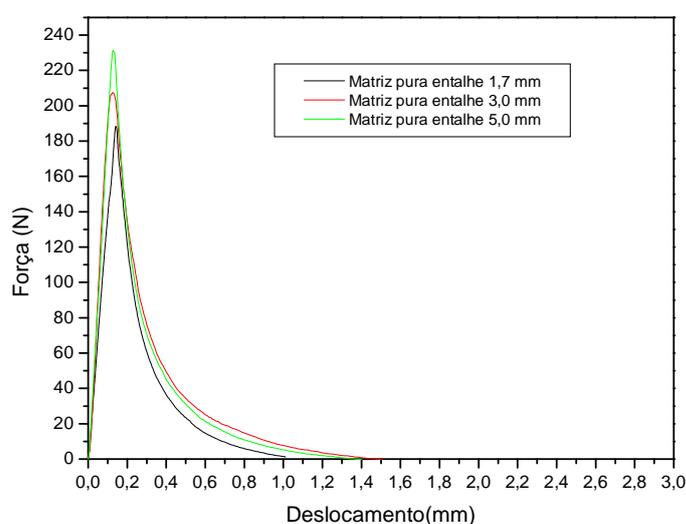


**Figura 43- Micro estrutura da matriz pura com entalhe de 5,0 mm mostrando porosidade**

Os corpos de prova de matriz pura com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm apresentaram características do comportamento carga x deslocamento semelhantes. O aspecto da fratura também apresentou similaridades. A discussão das propriedades mecânicas obtidas a partir desses diagramas será apresentada posteriormente.

#### 4.4.1.4 Resultado comparativo da matriz pura com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura

Na Figura 44 são apresentadas as curvas características das séries dos entalhes 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm para matriz pura.



**Figura 44 - Diagrama comparativo da matriz pura e entalhes de 1,7mm, 3,0 mm e 5,0 mm**

Observou-se que para a matriz pura com entalhe de 1,7 mm de espessura, a iniciação da trinca apresenta deslocamento de valor aproximado ao das matrizes puras com entalhes de 3,0 mm e 5,0 mm de espessura. Conforme pode ser visto na Figura 44.

Na análise dos diagramas carga x deslocamento para matriz pura observa-se que a carga inicia e cresce de modo estável rompendo abruptamente para entalhe de 1,7 mm de espessura. Este comportamento é seguido para os corpos de prova com 3,0 mm e 5,0 mm de espessura, ou seja com o aumento da carga a curva cresce e apresenta crescimento linear elástico até a carga máxima ocorrendo então um decaimento brusco desempenho típico de material frágil. A superfície de fratura apresenta aspecto rugoso com presença de vazios e porosidades que são provenientes do processo de fabricação. A superfície de fratura para os entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm apresentaram aspectos análogos entre si.

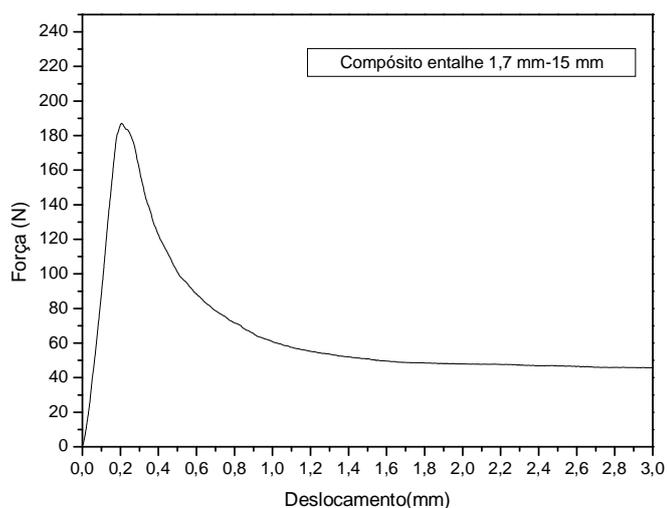
Durante a fabricação dos corpos de prova da matriz pura ocorreu à quebra dos mesmos, devido principalmente a retração plástica, onde se observou a maior quebra para as amostras com maior raio de curvatura. Observou-se que na inclusão do entalhe houve uma modificação no volume do corpo de prova e fazendo com que ele ficasse mais propenso a quebra para um maior entalhe. NUNES et al 2007 coloca que tensões de tração também surgem em decorrência de variações diferenciais de volume por toda a massa de concreto pelo fato de que os efeitos da retração não são uniformes por toda a massa. SAVASTANO, 2000 diz que a matriz sem reforço apresenta fissuração heterogênea, proveniente de retração na secagem do material.

#### **4.4.2 Corpos de prova do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 15,0 mm**

4.4.2.1 Corpos de prova com entalhe de 1,7 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 15,0 mm.

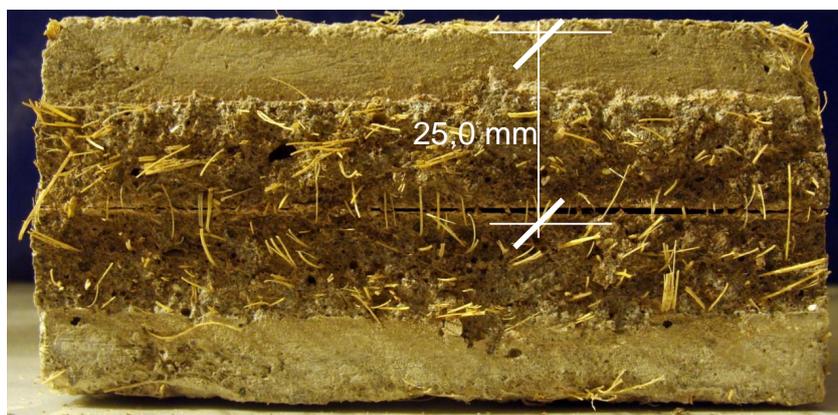
Foram realizados ensaios de flexão em três pontos em seis amostras para este tipo de entalhe. O gráfico da Figura 45 apresenta o comportamento típico da série com entalhe de 1,7mm do compósito reforçado com fibra de sisal de 15,0 mm de comprimento. Observa-se no gráfico que ao contrário do apresentado para a

matriz pura e entalhe de 1,7 mm o decaimento, após atingir a carga máxima de fratura, não foi brusco, alcançando níveis de deslocamento (e deformação) maiores. Foi observado um aumento na deformação do material compósito atingindo deslocamentos maiores quando comparado com a matriz pura e entalhe de 1,7 mm de espessura e ocorre pelo fato do material compósito inicialmente falhar na matriz transferindo a carga para as fibras que resiste ao carregamento, até a fratura total.



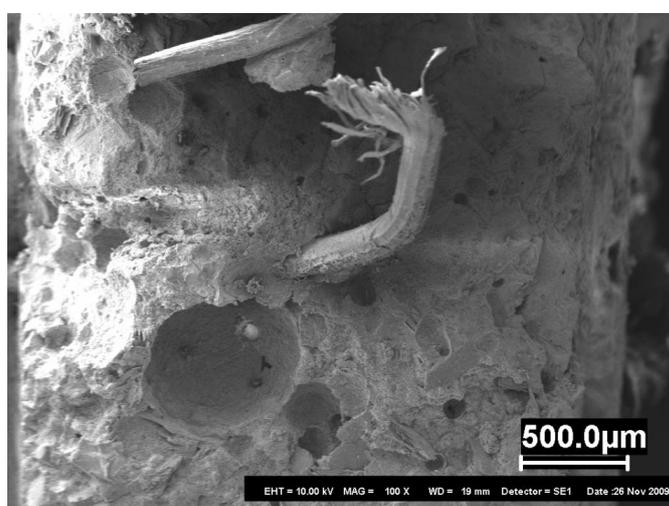
**Figura 45- Diagrama carga x deslocamento do compósito com entalhe de 1,7 mm e comprimento de fibra 15,0 mm**

A Figura 46 mostra o corpo de prova do compósito após o ensaio de flexão em três pontos. Pode-se observar as fibras expostas que foram arrancadas e rompidas na superfície de fratura.



**Figura 46 - Compósito de 1,7 mm com comprimento de fibra 15,0 mm após o ensaio de Flexão em Três Pontos**

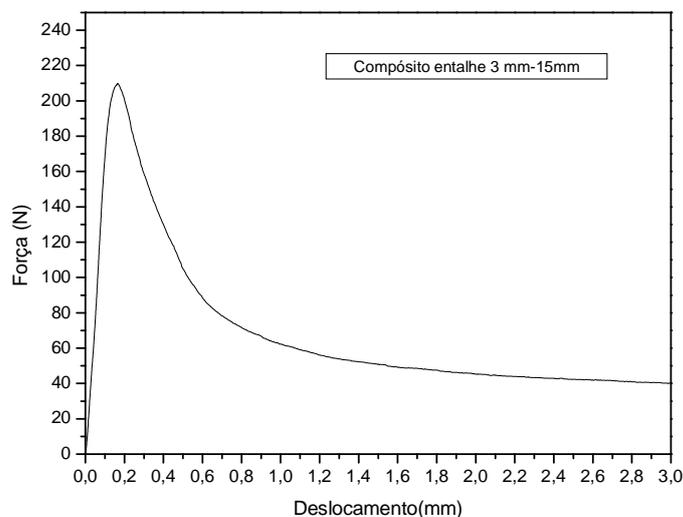
A Figura 47 mostra a fractografia do compósito de entalhe 1,7 mm e comprimento da fibra 15,0 mm. Nesta imagem pode-se notar as bolhas geradas no processo de fabricação e fibra rompida que indica uma boa aderência devido a adesão na matriz o que demonstra a eficácia do reforço. Para RODRIGUES, 2008 as fibras quando rompidas indicam maior efetividade do reforço.



**Figura 47- Compósito de entalhe 1,7 mm e dimensão da fibra 15,0 mm mostrando as bolhas geradas no processo de fabricação.**

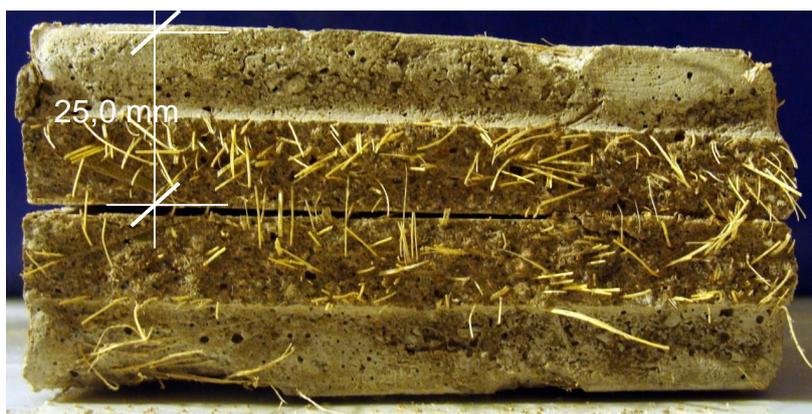
#### 4.4.2.2 Corpos de prova com entalhe de 3,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 15,0 mm

Foram preparados para ensaio de flexão em três pontos seis corpos de prova do compósito com entalhe de 3,0 mm. Este ensaio fornece dados sobre o carregamento aplicado e o deslocamento do ponto de aplicação da carga. A Figura 48 mostra a curva carga x deslocamento do corpo de prova com reforço para esta série de ensaio. Semelhante aos corpos de prova com entalhe de 1,7 mm houve um aumento significativo na deformação até a fratura total dos corpos de prova, comparado com os da matriz pura.



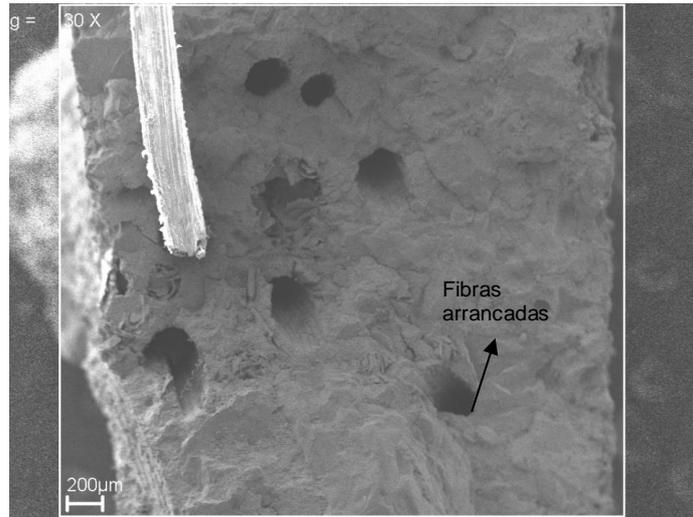
**Figura 48- Curva carga x deslocamento do compósito com entalhe 3,0 mm e comprimento de fibra de 15mm**

A Figura 49 retrata o compósito de argamassa de cimento com reforço de sisal e entalhe de 3,0 mm, após o ensaio de flexão em três pontos. A imagem as fibras que ficaram expostas após a fratura total do corpo de prova.



**Figura 49** Compósito de cimento e sisal, entalhe 3,0 mm, comprimento da fibra 15,0 mm

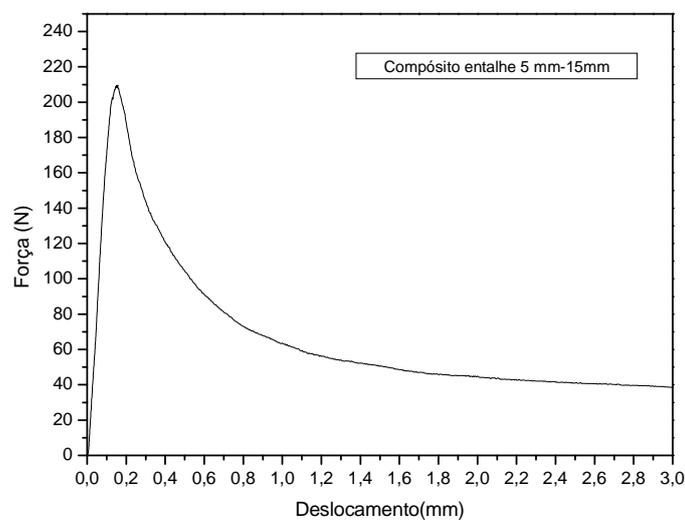
A Figura 50 mostra a imagem no MEV do compósito de cimento e sisal com comprimento da fibra 15,0 mm e entalhe 3,0 mm ampliada trinta vezes, nesta imagem observam-se: micro fissuras na matriz e pull out.



**Figura 50 - Imagem do compósito da argamassa de cimento e sisal no MEV, mostrando a fibra arrancadas e pull out**

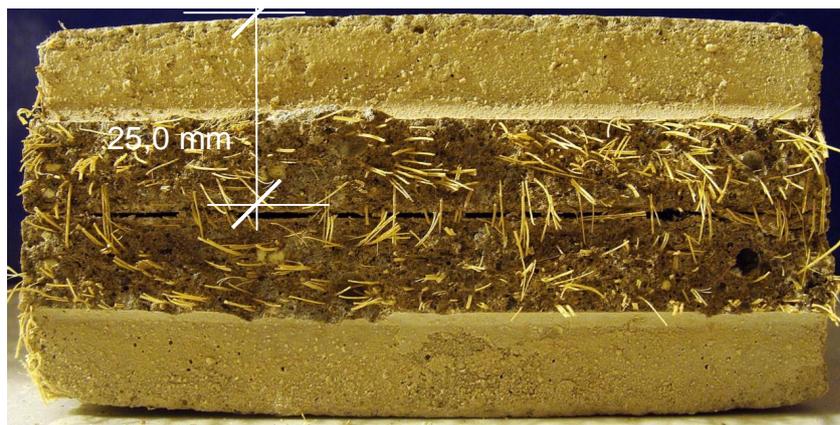
4.4.2.3 Corpos de prova com entalhe de 5,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 15,0 mm

Executou-se ensaio de flexão em três pontos nas seis amostras para o entalhe de 5,0 mm. A Figura 51 mostra o resultado da curva carga x deslocamento do compósito que é o resultado típico da série com entalhe de 5,0 mm.



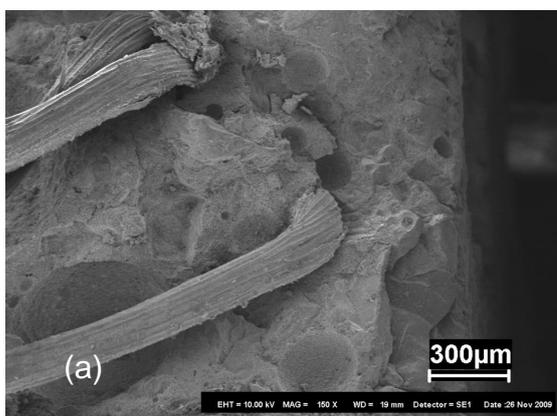
**Figura 51- Diagrama carga x deslocamento do compósito com entalhe 5,0 mm e comprimento de fibra 15,0 mm**

A Figura 52 retrata a matriz da argamassa de cimento com reforço de sisal de 15,0 mm de comprimento e entalhe de 5,0 mm após o ensaio de flexão em três pontos. A fotografia mostra o corpo de prova após o ensaio. Pode-se observar defeitos, porosidades, descolamento de fibras e fibras expostas.

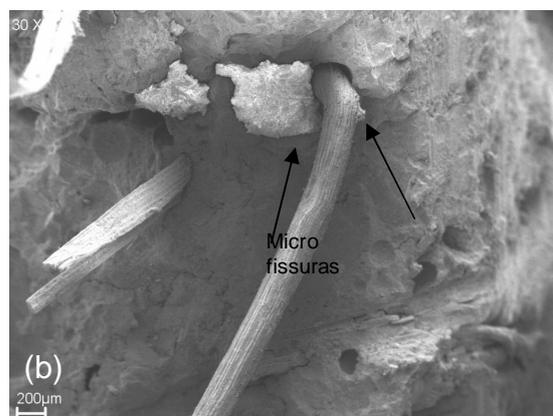


**Figura 52 - Compósito com comprimento da fibra 15,0 mm e entalhe 5,0 mm após o ensaio de Flexão em Três Pontos.**

A Figura 53 a-b mostra a fractografia obtida no MEV do compósito de cimento e sisal com comprimento da fibra 15,0 mm e entalhe 5,0 mm. Nesta imagem observa-se indicação de pull out e micro fissuras.

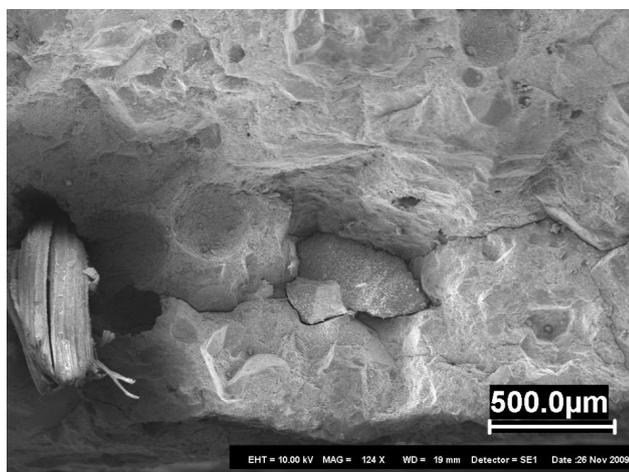


**Figura 53 (a) É MEV do compósito onde observa-se a indicação de pull-out**



**Figura 53 (b) - MEV do compósito onde observa-se a indicação de pull-out e micro fissuras próximo a fibra**

No mesmo corpo de prova apresentado na figura 52 a-b foi observado detalhes de micro fissuras como se observa na Figura 53.

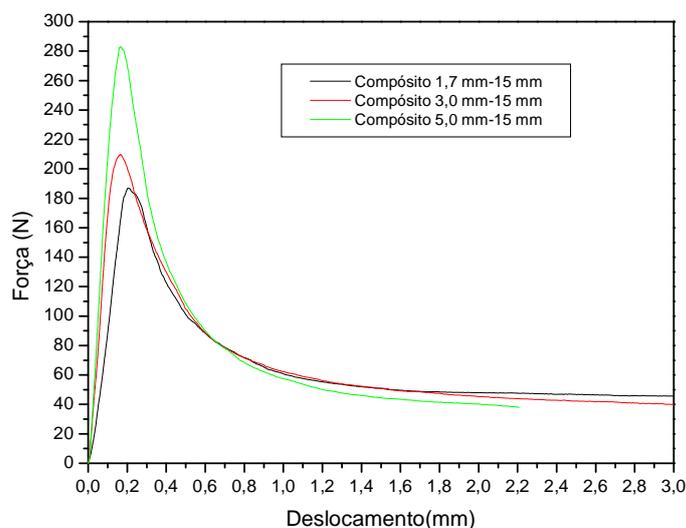


**Figura 54 - Micro fissuras**

4.4.2.4 Resultado comparativo entre o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm de comprimento com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura

A Figura 55 mostra a curva característica da série do entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm para o compósito com comprimento de fibra 15,0 mm. Observa-se que os dados dos gráficos indicam o comportamento do material compósito com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura se assemelham na transferência de carga para as fibras, que resistem ao carregamento até a fratura. Tal comportamento não acontece na matriz pura onde o colapso ocorre de forma brusca.

Na análise comparativa do aspecto da superfície de fratura para os entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura se pode notar a incidência de pull out, descolamento de fibra para todos os entalhes.



**Figura 55 - Diagrama comparativo do compósito com comprimento da fibra de 15,0 mm e entalhes de 1,7mm, 3mm e 5,0 mm**

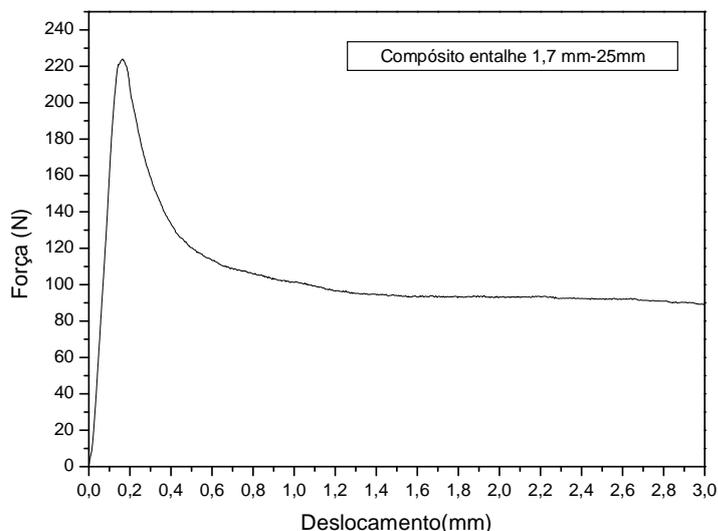
A Figura 55 mostra os resultados do Ensaio de Flexão em três pontos para os compósitos de comprimento de fibra 15,0 mm, onde se observou que para o entalhe de 1,7 mm o ponto correspondente ao deslocamento na carga máxima foi superior aos compósitos de entalhe 3,00 mm e 5,0 mm de espessura. Verifica-se também que o de menor entalhe reteve a carga atingindo um nível de deformação maior que o compósito de entalhes 3,0 mm e 5,0 mm.

#### **4.4.3 Corpos de prova do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 25,0 mm**

##### **4.4.3.1 Corpos de prova com entalhe de 1,7 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm**

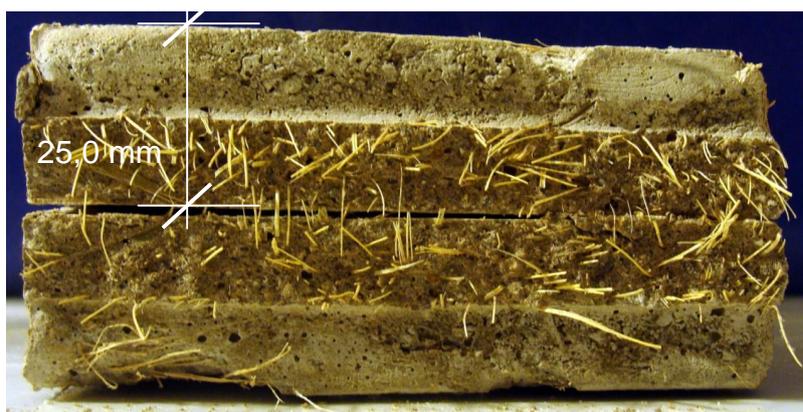
Foram realizados ensaios de flexão em três pontos em seis amostras para cada tipo de entalhe.

A Figura 56 apresenta o comportamento do diagrama carga x deslocamento do compósito, observa-se na figura que o compósito não sofre a ruptura brusca, suportando carga depois da carga máxima. O diagrama é o resultado típico da série com entalhe de 1,7mm do compósito.



**Figura 56- O diagrama carga x deslocamento do compósito com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 1,7 mm**

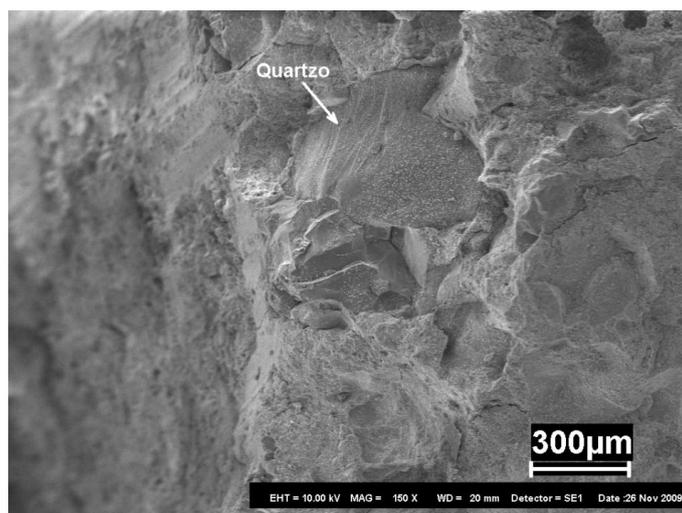
A Figura 57 mostra a mistura da argamassa de cimento com reforço de sisal de 25,0 mm de comprimento e entalhe de 1,7 mm após o ensaio de flexão em três pontos. A fotografia apresenta o compósito após o ensaio. As porosidades, descolamento de fibras e fibras expostas podem ser visualizados.



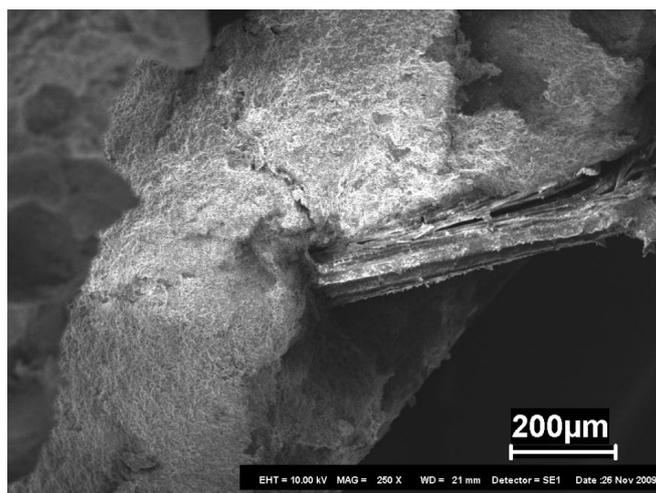
**Figura 57 - Compósito de argamassa de cimento com reforço de sisal de 25,0 mm de comprimento e entalhe de 1,7 mm**

A Figura 58 mostra microscopia eletrônica de varredura do compósito de cimento e sisal com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 1,7 mm onde se nota

um quartzo da areia. A fractografia da Figura 59 apresenta a amostra em outra posição e nesta imagem observa-se fissuras próximo à fibra que podem interferir na resistência do material. Pode-se notar o rompimento da fibra praticamente no plano de propagação da trinca. SAVASTANO JR, 2005 afirma que a trinca, ocorrendo próximo das fibras, é o resultado da tensão elástica interna de tração gerada pelas alterações de volume nas fibras.



**Figura 58- Compósito comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 1,7 mm**

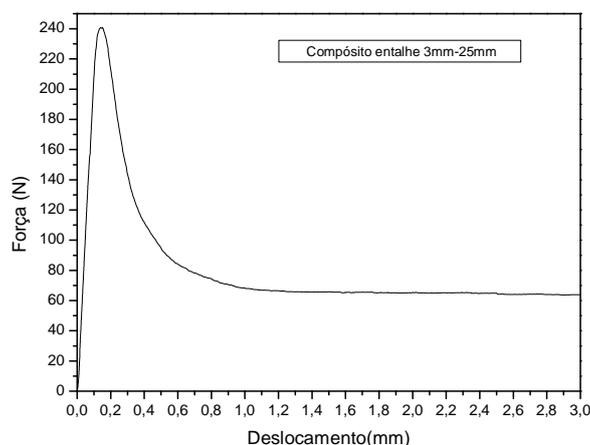


**Figura 59** É A imagem mostra fissuras próximas a fibra que podem interferir na resistência do material.

#### 4.4.3.2 Corpos de prova com entalhe de 3,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm

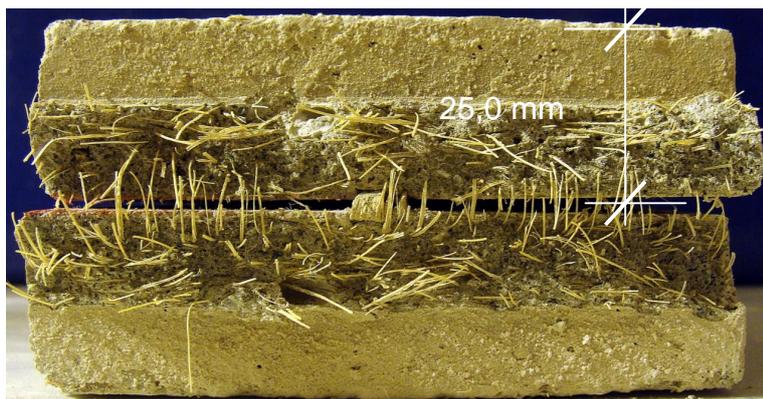
Realizou-se ensaio de flexão em três pontos em seis corpos de prova para esta série de compósito.

O diagrama da Figura 60 da carga x deslocamento do compósito é o resultado típico da série com entalhe de 3,0 mm. Observa-se que o compósito não sofre a ruptura brusca, suportando carga depois da carga máxima.



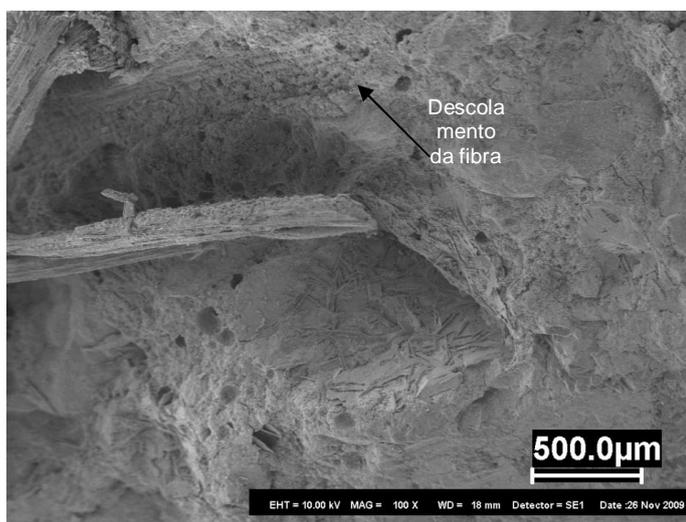
**Figura 60 - Diagrama carga x deslocamento do compósito com comprimento da fibra 25mm e entalhe 3,0 mm**

A Figura 61 mostra o compósito após o ensaio de flexão em três pontos.. A superfície de fratura foi observada mais detalhadamente no microscópio eletrônico de varredura.

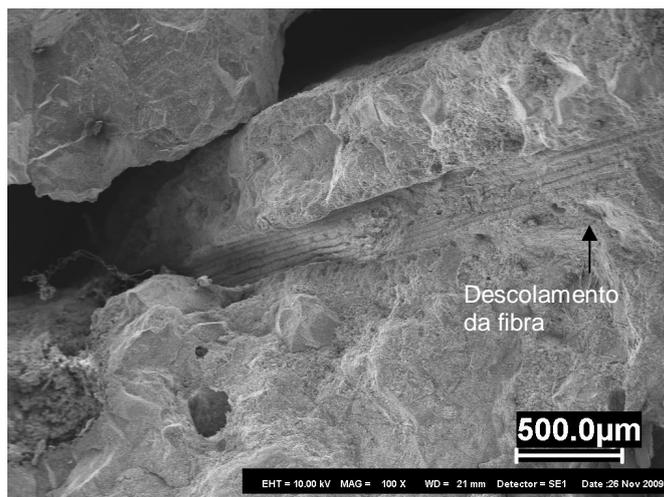


**Figura 61** É Compósito com 25,0 mm de comprimento da fibra e entalhe de 3,0 mm

A Figura 62 mostra a fractografia obtida em microscopia eletrônica de varredura do compósito de cimento e sisal com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 3,0 mm. A imagem mostra o descolamento da fibra. A Figura 63 mostra o mesmo material onde se pode observar com bastante clareza o descolamento da fibra.



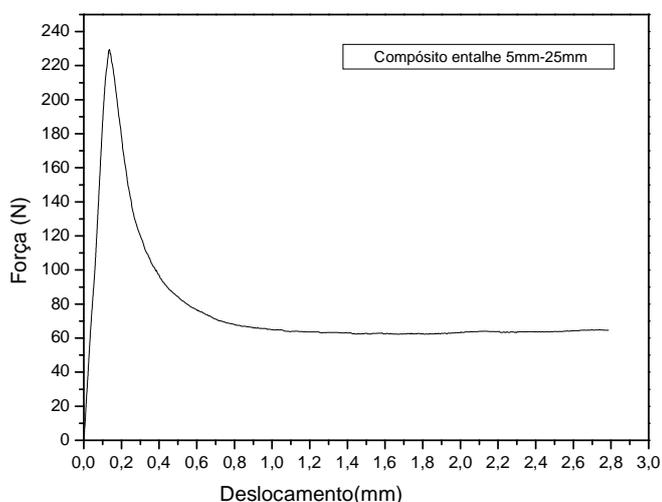
**Figura 62** É Fractografia do compósito com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 3,0 mm, onde se observa descolamento da fibra e fibra partida



**Figura 63 - Compósito mostrando o descolamento da fibra**

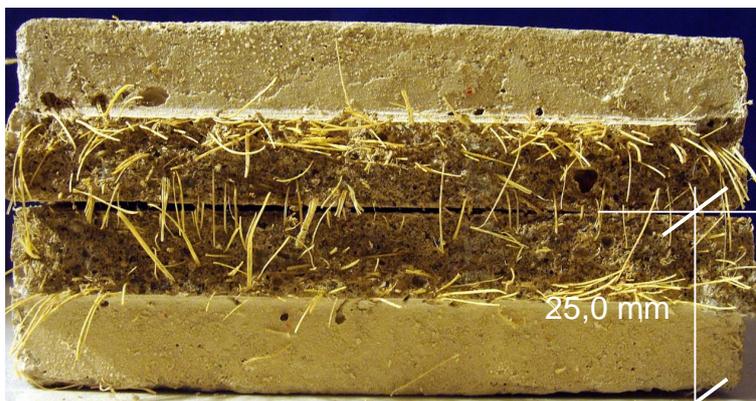
4.4.3.3 Corpos de prova com entalhe de 5,0 mm do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 25,0 mm

Executou-se ensaio de flexão em três pontos nas seis amostras para o entalhe de 5,0 mm. A Figura 64 mostra o resultado da curva carga x deslocamento do compósito que é o resultado típico da série com entalhe de 5,0 mm, onde se nota a melhora na performance da amostra com a adição das fibras, comparados com a matriz pura e reforçado com fibras de 15,0 mm de comprimento e mesmo entalhe de 5,0 mm.



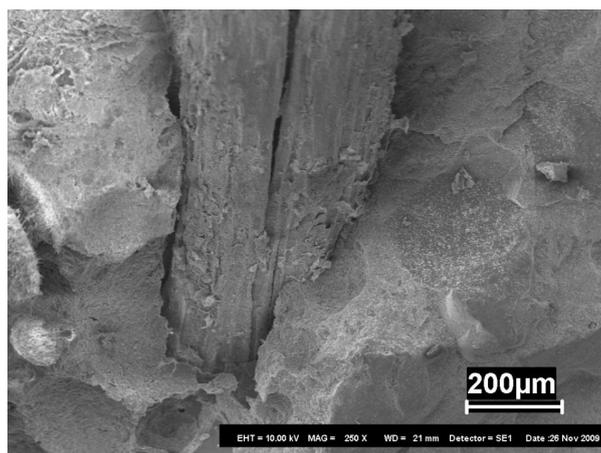
**Figura 64 - Diagrama carga x deslocamento do compósito com de 25,0 mm de comprimento da fibra e entalhe de 5,0 mm**

A Figura 65 mostra do compósito após o ensaio de flexão em três pontos onde se pode observar exposição das fibras que foram descoladas ou fraturadas pelo fenômeno de pull- out.



**Figura 65 - Compósito de argamassa de cimento com reforço de sisal de 25,0 mm de comprimento da fibra e entalhe de 5,0 mm**

A Figura 66 mostra microscopia eletrônica de varredura do compósito de cimento e sisal com comprimento da fibra 25,0 mm e entalhe 5,0 mm. A imagem mostra a fibra descolada e micro fissuras.



**Figura 66 É Fractografia mostrando a fibra descolada e micro-fissuras**

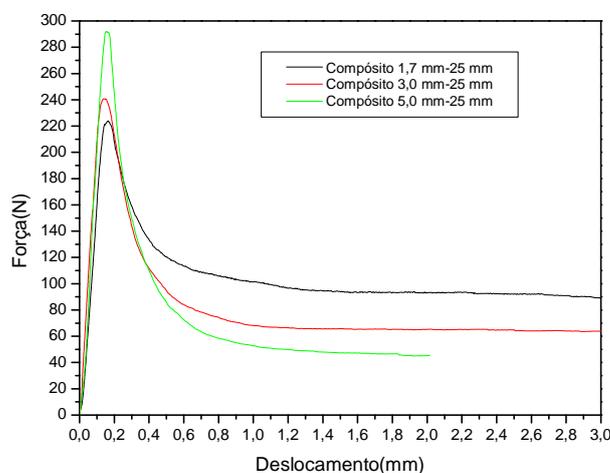
A avaliação da superfície fraturada das amostras dos compósitos com comprimentos de fibra de 15,0 mm e 25,0 mm mostra o pull out e fibras rompidas que indicam uma maior efetividade do reforço no mecanismo de falha dominante.

Apesar da variação do comprimento de fibras nos compósitos o mecanismo de falha não apresentou variação significativa do material fabricado. A presença de bolhas no interior do compósito pode ser em decorrência da dificuldade em eliminá-las pela inserção do reforço.

4.4.3.4 Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 25,0 mm de comprimento com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura.

A Figura 65 apresenta a curva típica das séries dos entalhes 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm para o compósito com comprimento de fibra 25,0 mm.

Nos diagramas comparativos das Figuras 55 e 67 pode-se observar um pequeno aumento da carga máxima acompanhando os raios de curvatura. Esta característica foi constatada por BRESCANSIN, 2003 quando observou que para o aumento do raio de curvatura do entalhe houve um ligeiro aumento da carga máxima. BRESCANSIN, 2003 afirma que as fibras funcionam como ponte de transferência de tensões através das fissuras que aparecem na matriz quando solicitada ao carregamento, proporcionando ao compósito maior capacidade de deformação. A incorporação de fibras em matrizes frágeis de cimento tem a função de aumentar a tenacidade do compósito através do processo de controle de propagação das fissuras resultantes e do aumento de resistência à tração e flexão.



**Figura 67 - Diagrama comparativo do compósito com comprimento da fibra de 25,0 mm e entalhes de 1,7mm, 3mm e 5,0 mm**

A Figura 67 apresenta os resultados dos Ensaio de Flexão em três pontos dos compósitos de 25,0 mm de comprimento da fibra para os três tipos de entalhe 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm onde se pode observar que analogamente ao compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm o ponto correspondente ao deslocamento da carga máxima para entalhe de 1,7 mm de espessura ficou superior ao de 3,0 mm e 5,0 mm. Observou-se que o compósito de 1,7 mm com comprimento da fibra 25,0 mm tal qual o compósito com a mesma espessura de entalhe e comprimento de fibra 15,0 mm reteve a carga atingindo uma deformação maior que os compósitos com entalhe de 3,0 mm e 5,0 mm.

#### 4.4.4 Análise comparativa dos resultados da matriz pura e compósitos de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimentos de 15,0 mm e 25,0 mm para cada tipo de entalhe

4.4.4.1 Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento com entalhe de 1,7 mm de espessura.

Na Figura 68 são apresentadas as curvas típicas das séries do entalhe 1,7 mm para matriz e compósito.

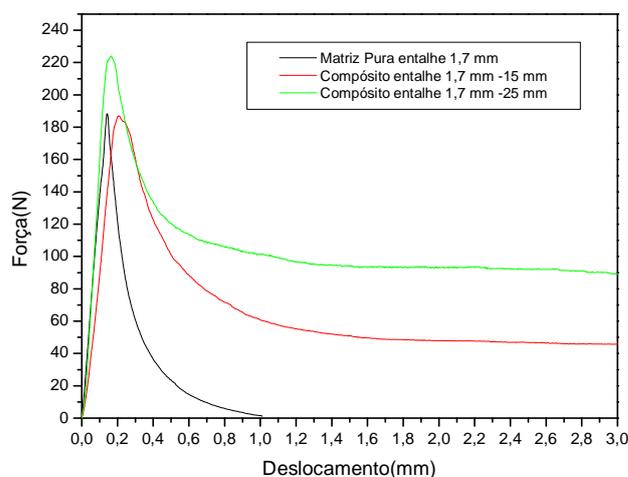
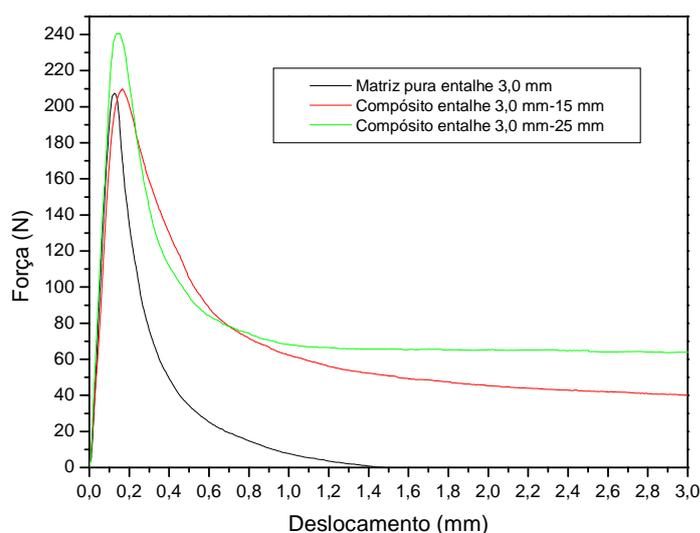


Figura 68 - Diagrama comparativo matriz/compósito com entalhe de 1,7 mm

Na Figura 68 pode-se observar que o ponto correspondente ao deslocamento da força máxima dos compósitos foram superiores ao da matriz pura. Na análise do diagrama carga versus deslocamento verificou-se que fibra quando introduzida na matriz atuou efetivamente na manutenção da carga ficando mais evidenciado para o compósito com comprimento de fibra 25,0 mm.

4.4.4.2 Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento com entalhe de 3,0 mm de espessura

A Figura 69 mostra a série típica e representativa da matriz e compósito do entalhe de 3,0 mm.

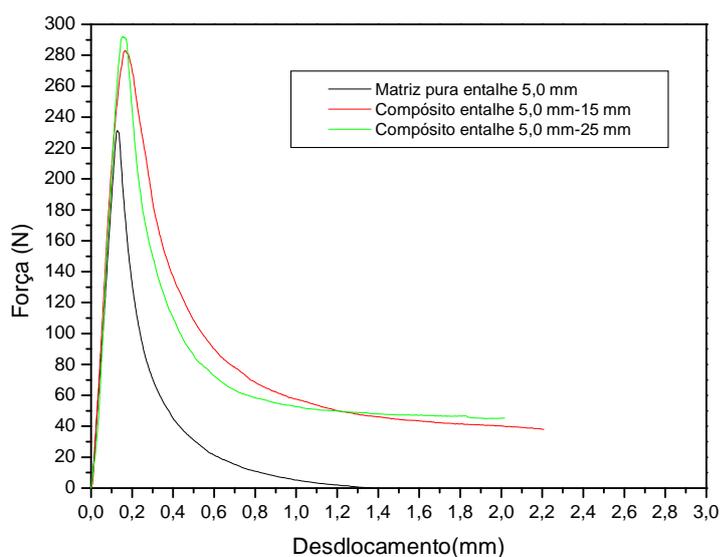


**Figura 69- Diagrama comparativo matriz/compósito com entalhe de 3,0 mm**

Na Figura 69 pode-se observar que o ponto correspondente ao deslocamento da força máxima dos compósitos foram superiores ao da matriz pura, evidenciando o deslocamento maior do compósito em relação à matriz pura. Observou-se que a fibra quando inserida na matriz cimentícia agiu efetivamente na manutenção da carga, e que o compósito com o mesmo entalhe e com comprimento de fibra 25,0 mm foi mais efetivo como reforço do que o compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm.

#### 4.4.4.3 Resultado comparativo entre a matriz pura e o compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento com entalhe de 5,0 mm de espessura

A Figura 70 apresenta a série típica e representativa da matriz pura e compósito do entalhe de 5,0 mm.



**Figura 70 - Diagrama comparativo matriz- compósito entalhe de 5,0 mm**

Na Figura 70 pode-se observar que o ponto correspondente ao deslocamento da força máxima dos compósitos ficou superior ao da matriz pura. A introdução da fibra fez com que a carga fosse mantida. O compósito com o mesmo entalhe com comprimento de fibra 25,0 mm obteve reforço mais efetivo na manutenção da carga quando comparado ao compósito com comprimento de fibra de 15,0mm.

Nos diagramas apresentados nas Figuras 68, 69 e 70 pode-se perceber que as curvas de amostras da matriz pura a carga inicia e cresce de modo estável, rompendo abruptamente caracterizando um comportamento frágil do material. Entretanto verifica-se que a adição de fibras tem influência significativa no comportamento pós-pico do compósito. Na ruptura do compósito após o trincamento da matriz este ainda apresenta resistência pós-fratura. Verificou-se que, embora a resistência mecânica tenha diminuído, com a adição da fibra de sisal, aumentou a

tenacidade das matrizes diminuindo sua fragilidade, ficando um material menos frágil, onde o reforço trabalhou após o trincamento da matriz. SAVASTANO, 2000 em pesquisa realizada em matrizes cimentícias reforçadas com fibras residuais (sisal, malva e coco) para a produção de telhas afirma que, mesmo com significativa redução da força suportada, as telhas reforçadas com fibras de sisal, coco e malva mostraram capacidade suplementar de absorção de energia, em lugar do colapso instantâneo observado para os demais compósitos e matriz sem reforço.

Na análise dos diagramas Força x Deslocamento pode-se notar que a matriz pura com entalhe de 1,7 mm apresentou uma resistência inferior em relação aos compósitos de entalhe 1,7 mm com comprimento de fibra 15,0 mm e 25,0 mm. A matriz pura e os compósitos de entalhe de 3,0 mm com comprimento de fibra 15,0 mm e 25,0 mm apresentaram valores aproximados para a resistência à flexão. Para a amostra com o entalhe de 5,0 mm, a resistência à flexão da matriz pura mostrou-se inferior a dos compósitos com comprimentos de fibra 15,0 mm e 25,0 mm. Os resultados da resistência a flexão com comprimento da fibra de 25,0 mm obtiveram uma resistência superior em todos os entalhes no caso 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm. Pode-se observar que o diagrama da matriz pura e dos compósitos com comprimento de fibra 15,0mm e 25,0 mm para entalhe de 3,0mm apresentaram variação de forma pouco expressiva para os resultados de resistência à flexão sugerindo pouca influência no comprimento da fibra para o entalhe de 3,0 mm. TOLEDO FILHO et al, 1997 analisando a influência das fibras em pesquisa realizada com ensaio de compressão e fibras de sisal de comprimento 15,0 mm e 25,0 mm comprovou que à exceção do comportamento de pós pico, as propriedades das misturas foram praticamente as mesmas.

#### **4.4.5 Análise dos resultados do Ensaio de Flexão em Três Pontos**

Nesta seção serão apresentadas as análises dos resultados da resistência à flexão e carregamento aplicado obtidas através do ensaio de flexão em três pontos.

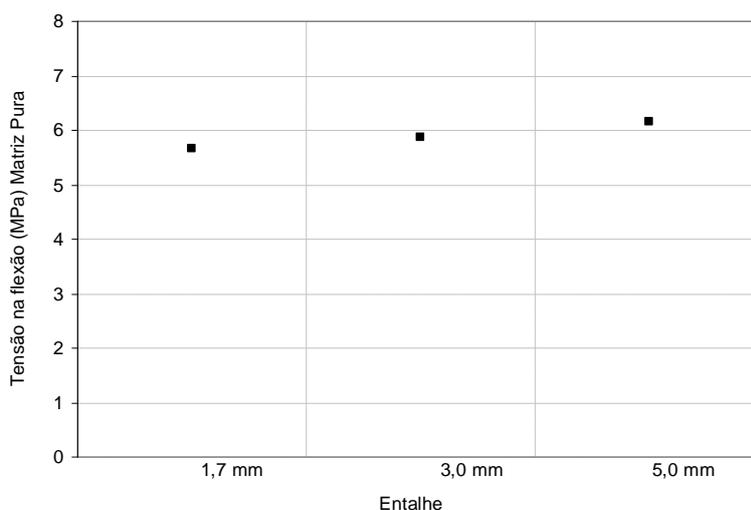
A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos para a matriz pura com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de flexão da matriz pura com os três tipos de entalhe.

Tipo de Amostra	Entalhes	Força Máxima (N) Média (D P)	Resist. Flexão Máxima (MPa) Média (DP)
Matriz Pura	1,7mm	199,0 ( $\pm 9,19$ )	5,65 ( $\pm 0,39$ )
	3,0 mm	211,0 ( $\pm 3,53$ )	5,88 ( $\pm 0,35$ )
	5,0 mm	245,2 ( $\pm 34,64$ )	6,15 ( $\pm 0,82$ )

Verificou-se que a resistência à flexão da matriz pura com 3,0 mm de entalhe é superior a matriz pura com 1,7 mm de entalhe, em 4%, e a resistência da matriz pura de entalhe 5,0 mm é superior a de entalhe 1,7 mm em 8%.

A Figura 71 mostra os resultados da tensão à flexão, obtidos para entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm nas amostras de matriz pura.



**Figura 71 - Resultado dos ensaios de tensão à flexão da matriz pura com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm**

A Tabela 8 e a Figura 71 ilustram as propriedades da matriz pura com os entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura. Como não se tem qualquer tipo de reforço desta matriz e trincas agudas são mais intensas como defeitos, ou seja, o material fica mais sensível a entalhes agudos, por isso o valor da tensão para 1,7 mm de espessura apresenta menor valor quando comparada com os entalhes de 3,0 mm e 5,0 mm de espessura. A mesma observação pode ser feita quando se faz

a comparação da influência do entalhe de 3,0 mm de espessura com a trinca de 5,0 mm de espessura.

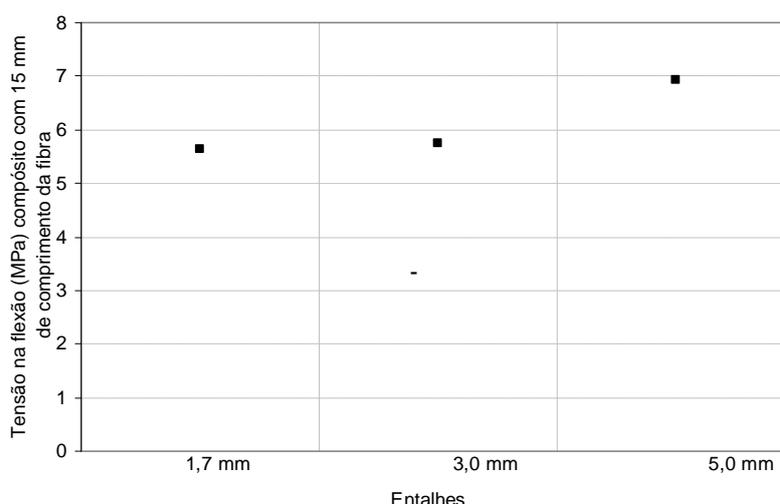
A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos para os compósitos de argamassa de cimento reforçados com fibra de sisal com 15,0 mm de comprimento.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de flexão com os três tipos de entalhe do compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal de 15,0 mm de comprimento

Tipo de Amostra	Entalhes	Força Máxima (N)	Resist. Flexão Máxima (MPa)
		Média(D P)	Média (D P)
Compósito 15,0 mm	1,7mm	178,0 ( $\pm 35,52$ )	5,63 ( $\pm 0,42$ )
	3,0 mm	210, 7( $\pm 26,16$ )	5,75 ( $\pm 0,89$ )
	5,0 mm	244,83( $\pm 66,46$ )	6,93 ( $\pm 0,61$ )

Nos compósitos com comprimento de fibra de 15,0 mm observou-se que a resistência da amostra com entalhe de 3,0 mm é 2% superior em relação à amostra de entalhe 1,7 mm, e a resistência da amostra com entalhe de 5,0 mm é 23,1% superior em relação à amostra de entalhe 1,7 mm.

A Figura 72 mostra os resultados da tensão à flexão, obtidos para entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm, nas amostras do compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal e comprimento de fibra 15,0 mm.



**Figura 72 - Resultado dos ensaios de tensão à flexão do compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm e entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura**

Os resultados mostrados na Tabela 9 e Figura 72 ilustram as tensões devido à presença de entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura. Analogamente ao comportamento da matriz pura, o entalhe mais agudo (1,7 mm) apresentou maior sensibilidade ao material, fazendo com que o nível de tensão ficasse menor quando comparado com os entalhes de maior espessura. O compósito com entalhe de 5,0 mm apresentou maior nível de tensão devido à menor sensibilidade do entalhe, associado à presença das fibras de reforço do material compósito.

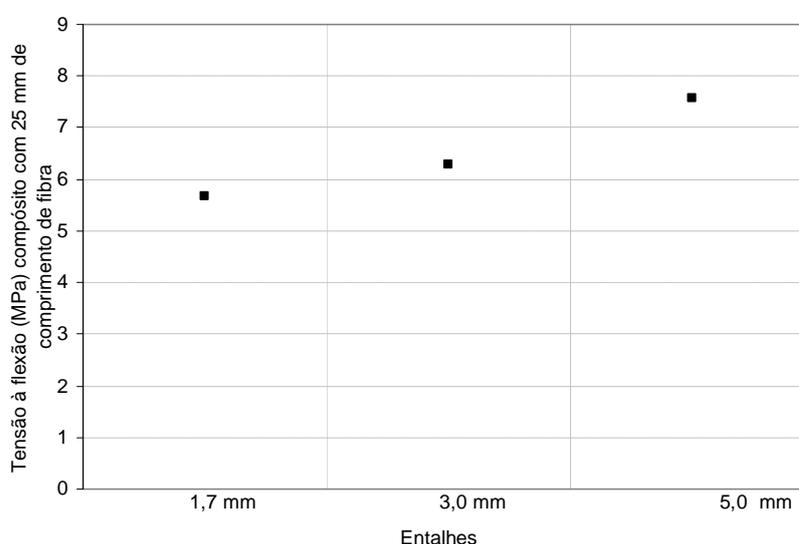
A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão em três pontos para os compósitos de argamassa de cimento reforçados com fibra de sisal com 25,0 mm de comprimento.

**Tabela 10 - Resultados do ensaio de flexão com os três tipos de entalhe do compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal de 25,0 mm de comprimento**

Tipo de Amostra	Entalhes	Força Máxima (N) Média(D P)	Resist. Flexão Máxima(MPa) Média (D P)
Compósito 25,0 mm	1,7mm	220,5 (± 40,31)	5,68 (± 0,96)
	3,0 mm	245,0 (± 41,01)	6,29 (± 0,03)
	5,0 mm	278,0 (± 40,3)	7,58 (± 0,46)

Na análise das amostras com comprimento de fibra de 25,0 mm notou-se que a resistência do compósito com entalhe de 3,0 mm ficou 11% superior a resistência do compósito com entalhe de 1,7 mm e a resistência do compósito de entalhe 5,0 mm ficou 33% superior ao compósito com entalhe de 1,7 mm. Observou-se que os compósitos mostraram capacidade suplementar de absorção de energia o que não aconteceu com a matriz pura havendo um colapso brusco.

A Figura 73 apresenta os resultados da tensão à flexão, obtidos para entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm nas amostras de compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal e comprimento de fibra 25,0 mm.



**Figura 73 - Resultado dos ensaios de tensão à flexão do compósito com comprimento de fibra de 25,0 mm e entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura**

Os materiais compósitos com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de espessura reforçados com fibras de 25,0 mm de comprimento apresentaram comportamento similar aos apresentados para os reforçados com fibras de 15,0 mm de comprimento, ou seja, para o entalhe mais agudo a tensão foi menor e crescente para os entalhes de 3,0 mm e 5,0 mm de espessura como pode ser observado na Tabela 10 e figura 73.

Os resultados alcançados no ensaio de flexão em três pontos da matriz de argamassa de cimento e compósito com entalhe de 1,7 mm e comprimento da fibra de 15,0 mm e 25,0 mm estão demonstrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal com entalhe de 1,7 mm

Tipo de Amostra	Entalhe	Força Máxima (N) Média (DP)	Rest. Flexão Máxima (MPa) Média(DP)
Matriz Pura	1,7 mm	199,0 ( $\pm$ 9,19)	5,65 ( $\pm$ 0,39)
Compósito 15,0 mm	1,7 mm	178,0 ( $\pm$ 32,52)	5,63 ( $\pm$ 0,42)
Compósito 25,0 mm	1,7 mm	220,5 ( $\pm$ 40,31)	5,68 ( $\pm$ 0,96)

Verificou-se que a resistência do compósito de entalhe 1,7 mm e comprimento de fibra 15,0 mm ficou 0,1% inferior à matriz pura, a resistência do compósito de entalhe 1,7 mm e comprimento de fibra 25,0 mm ficou 0,5 % superior em relação à matriz pura.

Os resultados alcançados no ensaio de flexão em três pontos da matriz de pura e compósito com entalhe de 3,0 mm de espessura e comprimento da fibra de 15,0 mm e 25,0 mm estão demonstrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal com entalhe de 3,0 mm

Tipo de Amostra	Entalhe	Força Máxima(N) Média (DP)	Rest. Flexão Máxima(MPa) Média(DP)
Matriz Pura	3,0 mm	211,0 ( $\pm$ 3,53)	5,88 ( $\pm$ 0,35)
Compósito 15,0 mm	3,0 mm	210,0 ( $\pm$ 26,16)	5,74 ( $\pm$ 0,89)
Compósito 25,0 mm	3,0 mm	245,0 ( $\pm$ 41,01)	6,29 ( $\pm$ 0,03)

A resistência para os compósitos com entalhe de 3,0 mm e comprimento de fibra 15,0 mm ficou 2% inferior à matriz pura e a resistência do compósito com comprimento de fibra 25,0 mm ficou 7% superior à matriz pura.

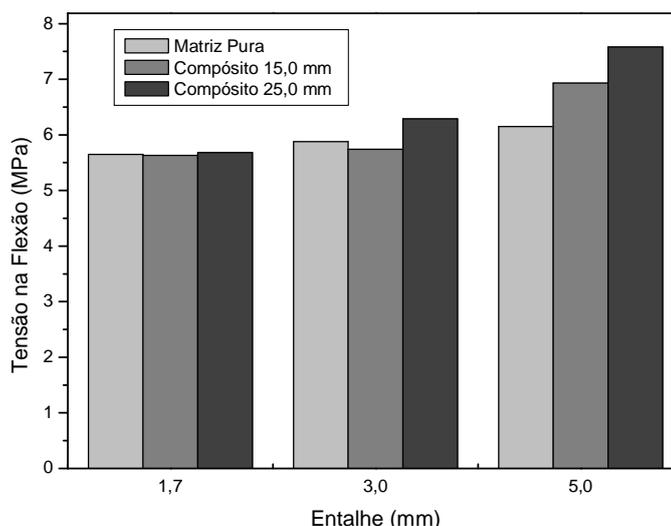
Os resultados alcançados no ensaio de flexão em três pontos da matriz pura e compósito com entalhe de 5,0 mm de espessura e comprimento da fibra de 15,0 mm e 25,0 mm estão demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento com fibra de sisal com entalhe de 5,0 mm

Tipo de Amostra	Entalhe	Força Máxima(N) Média (D P)	Rest. Flexão Máxima (MPa) Média(D P)
Matriz Pura	5,0 mm	245,2 ( $\pm 34,64$ )	6,15 ( $\pm 0,82$ )
Compósito 15,0 mm	5,0 mm	244,8 ( $\pm 66,46$ )	6,93 ( $\pm 0,61$ )
Compósito 25,0 mm	5,0 mm	278,6 ( $\pm 40,3$ )	7,58 ( $\pm 0,97$ )

Na análise das amostras com entalhe de 5,0 mm observou-se que a resistência do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento da fibra de 15,0 mm ficou 11% superior à matriz pura e a resistência do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de fibra da 25,0 mm ficou 23% superior à matriz pura.

A Figura 74 mostra os resultados da tensão à flexão, obtidos para entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm nas amostras de matriz pura, compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm e compósito com comprimento de fibra de 25,0 mm. A comparação entre os resultados alcançados para a tensão à flexão nas amostras com entalhe de 3,0 mm da matriz pura, compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm e compósito com comprimento de fibra de 25,0 mm. Os resultados da tensão à flexão, obtidos para entalhe de 5,0 mm nas amostras de matriz pura, compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm e compósito com comprimento de fibra de 25,0 mm.



**Figura 74- Resultado dos ensaios de tensão à flexão com entalhe de 1,7 mm,3,0 mm e 5,0 mm de matriz pura, compósitos com comprimento de fibras de 15,0 mm e 25,0 mm**

Avaliando a influência da presença do entalhe de 1,7 mm de espessura na matriz pura e o material compósito reforçado com fibra de 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento na Figura 74, observa-se que os valores de tensão ficaram bastante próximos, provavelmente devido à sensibilidade do menor entalhe. Observou-se também a pouca interferência do comprimento da fibra nas amostras, tanto da matriz pura como dos compósitos com comprimento de fibra de 15,0 mm e 25,0 mm.

A Figura 74 mostra a comparação entre os resultados alcançados para a tensão à flexão nas amostras com entalhe de 3,0 mm da matriz pura, compósito com comprimento de fibra de 15,0 mm, compósito com comprimento de fibra de 25,0 mm. Observa-se que para a matriz pura foi registrado nível de tensão ligeiramente superior comparando com o compósito de 15,0 mm de comprimento da fibra, semelhante ao que aconteceu com os corpos de prova com 1,7 mm de espessura do entalhe. Para comprimento de fibra de 25,0 mm foi observado valores superiores aos apresentados para a matriz pura e 15,0 mm de comprimento, similar ao que ocorreu para as trincas de 1,7 mm de espessura, mostrando que as maiores comprimento de fibra, garantem maior resistência mecânica para entalhes apresentados.

Para entalhe de 5,0 mm de espessura são apresentados Figura 74, a matriz pura apresentou valor de resistência à flexão inferior àqueles materiais compósitos

reforçados com fibras de 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento. Com o aumento do comprimento da fibra para 25,0 mm, foi observado um aumento da resistência mecânica quando comparado com a matriz pura e com os materiais compósitos reforçados com fibra de 15,0 mm de comprimento.

Os resultados da pesquisa com corpos de prova sem entalhe da matriz pura, e compósito de argamassa de cimento e fibras de sisal de 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento deste trabalho, executada em conjunto com o trabalho realizado por MARTINS NETO, 2010, foram obtidos os valores especificados na Tabela 14 onde se pode observar quando comparado com a Tabela 15 que o valor da resistência à flexão para a matriz pura sem entalhe ficou superior a todos os valores de resistência à flexão da matriz pura com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm. Observou-se ainda que os valores da resistência à flexão dos compósitos de comprimento com fibra de 15,0 mm e entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm ficaram superiores ao do compósito sem entalhe de 15,0 mm, fabricados por MARTINS NETO, 2010, como está demonstrado na Tabela 16. Comparando os dados da resistência à flexão dos compósitos de comprimento com fibra de 25,0 mm e entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm ficaram inferiores ao compósito de 25,0 mm sem entalhe, produzidos por MARTINS NETO, 2010, entretanto o compósito com entalhe de 5,0 mm ficou superior ao do compósito sem entalhe de 25,0 mm.

Analisando os valores do carregamento da pesquisa de MARTINS NETO, 2010 na Tabela 14, verificou-se que a matriz pura com os entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm foram inferiores a matriz pura sem entalhe. Os dados do carregamento para os compósitos com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de comprimento da fibra 15,0 mm ficaram inferiores do compósito sem entalhe fabricados por MARTINS NETO, 2010 com comprimento de fibra de 15,0 mm. Os valores encontrados para o carregamento dos compósitos com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm de comprimento da fibra 25,0 mm foram inferiores do compósito sem entalhe com comprimento de fibra de 25,0 mm, como pode ser observado na Tabela 17. A explicação da diminuição da carga máxima para os corpos de prova entalhados se deve segundo BRESCANSIN, 2003 é que a carga máxima na presença do entalhe é consideravelmente inferior à atingida nos corpos de prova não entalhado, isto se deve preliminarmente a redução considerável da área resistente do corpo de prova (devido a presença do entalhe) e no segundo lugar do efeito concentrador de tensões associado ao mesmo.

Tabela 14 . Resultados do ensaio de flexão da matriz pura e compósito de argamassa de cimento e sisal com comprimento de fibra de 15,0 mm e 25,0 mm sem entalhe.

Tipo de Amostra (Sem entalhe)	Força (N) Média(DP)	Resist. à Flexão(MPa) Média(DP)
Matriz Pura	1254(± 97,13)	7,524(± 0,583)
Compósito 15,0mm	826,9(± 116,6)	4,96 (± 0,70)
Compósito 25,0 mm	1045(± 105,4)	6,272(± 0,632)

Dados de MARTINS NETO, 2010

Tabela 15 . Comparação dos resultados do ensaio à Flexão em Três Pontos da matriz pura sem entalhe com a matriz com entalhe de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm

Tipo de Amostra	Entalhes	Força(N) Média(DP)	Resist. Flexão(MPa) Média(DP)
Matriz Pura	S/ entalhe	1254(± 97,13)	7, 524(± 0,583)
	1,7 mm	199 (± 9,19)	5,65 (± 0,39)
	3,0 mm	211 (± 3,53)	5,88 (± 0,35)
	5,0 mm	245,2 (± 34,64)	6,15 (± 0,82)

Tabela 16 . Resultados comparativos do ensaio à Flexão em Três Pontos do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 15,0 mm

Tipo de Amostra	Entalhes	Força(N) Média(DP)	Resist. Flexão(MPa) Média(DP)
Compósito/15,0 mm(fibra)	S/ entalhe	826,9(± 116,6)	4,96 (± 0,70)
	1,7 mm	178 (± 35,52)	5,63 (± 0,42)
	3,0 mm	210,0 (± 26,16)	5,75 (± 0,89)
	5,0 mm	244,83 (± 66,46)	6,93 (± 0,61)

Tabela 17 - Resultados comparativos do ensaio à Flexão em Três Pontos do compósito de argamassa de cimento e fibra de sisal com comprimento de 25,0 mm

Tipo de Amostra	Entalhes	Força(N) Média(DP)	Resist. Flexão(MPa) Média(DP)
Compósito/25,0 mm(fibra)	S/ entalhe	1045(± 105,4)	6, 272(± 0,632)
	1,7 mm	220,5 (± 40,31)	5,96 (± 0,96)
	3,0 mm	245,0 (± 41,01)	6,29 (± 0,03)
	5,0 mm	278,0 (± 40,3)	7,58 (± 0,46)

Em todas as situações onde são comparados os corpos de prova da matriz pura e reforçados com fibras de 15,0 mm e 25,0 mm de comprimento, observa-se que sempre a matriz pura apresenta valores de carga e tensão superiores, porém com menores níveis de alongamento e deformação. Esta diminuição se deve ao fato da fibra fragilizar o material compósito, ou seja, as fibras ficam envolvidas pela matriz, e trincas e micro trinca são observados, originados a partir dessas fibras. E como era de se esperar o aumento no comprimento das fibras também geram um aumento na carga e tensões quando comparando as fibras de 15,0 mm e 25,0 mm.

Sob o ponto de vista dos entalhes em todos os ensaios tanto para a matriz pura como para os materiais como para os materiais compósitos, foi observado que para trincas mais agudas, neste caso 1,7 mm de espessura, valores de carga e tensão são inferiores, quando comparados com 3,0 mm e 5,0 mm de espessura, isto se deve ao fato de entalhes mais agudos serem mais perigosos nos materiais, principalmente com características frágeis como é o caso da matriz de argamassa de cimento.

#### 4.4.5.1 Determinação da tenacidade à fratura nos corpos de prova entalhados

A Tabela 18 apresenta os resultados da tenacidade à fratura dos corpos de prova com os entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm para matriz pura e compósitos com comprimento de fibras 15,0 mm e 25,0 mm.

Tabela 18 . Resultados da tenacidade à fratura com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm da matriz pura e compósito s com comprimento de fibra 15,0 mm e 25,0 mm

Entalhe (mm)	Matriz Pura $K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	Compósito 15,0 mm $K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	Compósito 25,0 mm $K_{IC}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
1,7	0, 12	0, 11	0, 15
3,0	0, 13	0, 14	0, 15
5,0	0, 16	0, 15	0, 18

De acordo com a Tabela 18 a tenacidade à fratura para a matriz pura aumentou com o aumento do raio de curvatura. Resultado similar foi observado para o material compósito de comprimento de fibras de 15,0 mm e 25,0 mm. BRESCANSIN, 2003 em procedimento experimental com material similar comprovou o aumento do valor não só de  $K_{IC}$  como de J com o crescimento do raio de curvatura.

## 5 CONCLUSÃO

O método de fabricação empregado na pesquisa mostrou-se satisfatório principalmente pela facilidade na aquisição dos materiais empregados tanto da matriz pura quanto do compósito.

A produção dos compósitos da fibra de sisal é tecnicamente executável e viável economicamente nos lugares onde há abundância de matéria prima.

As fibras de sisal apesar de terem sido utilizadas in natura na caracterização das mesmas apresentaram bons níveis de resistência à tração, compatíveis com os encontrados na literatura.

O valor médio de resistência à tração da fibra de sisal foi de 251,84 MPa compatível com dados da literatura.

A vaselina industrial é um desmoldante eficaz para aplicação nas paredes internas de moldes de madeira e acrílico quando se trata de materiais de argamassa de cimento.

A areia comercial pode ter contribuído para a quebra dos corpos de prova durante a fabricação bem como a ação do vento a umidade relativa do ar e a elevada temperatura.

A utilização da Areia Normal Brasileira e a colocação dos corpos de prova em câmara úmida com redução da entrada do vento no ambiente reduziram a quebra em quase 100%. A utilização da areia padronizada economizou tempo no preparo das argamassas.

Um melhor adensamento da argamassa foi obtido com o vibrador de imersão.

As amostras da matriz pura com entalhes de 1,7 mm, 3,0 mm e 5,0 mm apresentaram valores de resistências superiores aos dos compósitos, quando utilizadas fibras de comprimento 15,0 mm. Entretanto a resistência dos compósitos com comprimento de fibra 25,0 mm ficou superior a resistência da matriz pura e do compósito de 15,0 mm de comprimento de fibra.

Na matriz pura ocorreu uma predominância da retração plástica, principalmente nos corpos de prova de maior raio de curvatura.

Os resultados do experimento permitiram concluir que a presença das fibras de sisal, inseridas na pasta de cimento, provocou restrição à retração plástica da mistura fresca, possivelmente pela elevada capacidade de absorção de água do

reforço fibroso, que pode ter levado a uma maior retenção do líquido, restringindo seu movimento até a superfície, onde estaria sujeito à evaporação.

Verificou-se um incremento na resistência mecânica com a adição das fibras de sisal entre as séries de entalhes, porém constatou-se o aumento da tenacidade dos compósitos para todos os entalhes diminuindo a tendência de fratura brusca.

O mecanismo de falha dominante na superfície de fratura dos compósitos com comprimento de fibra 15,0 mm e 25,0 mm foi praticamente o mesmo, ou seja, apresentaram fibras expostas por arrancamento (pull out) e vazios originados pelas fibras que foram arrancadas.

## REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; JONH, V. M.; DEROLLE, A. **Construindo com fibras vegetais**. A construção, São Paulo, p. 21-24, 1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS . ASTM. Standard Test Methods for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fibre-Reinforced Concrete ( Using beam with Third Point Loading) ASTM D 1018- 92.

ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press. 1995.

ANDRADE, SABINA DA MEMÓRIA CARDOSO DE, **Avaliação de Polietileno Reciclado carregado com Fibra de Palma para confecção de Módulo**.2007. 30f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia Básico de utilização do cimento Portland. 7.ed. , São Paulo, 28p.(BT-106).2002.

ATODARIA, D. R.; PUTATUNDA, S. K.; MALLICK, P. K. (1997). **A Fatigue crack growth model for random fiber composites**. Lancaster: Journal of Composite Materials, v. 31, n.18, p. 2645-2659.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. London, England: Elsevier Science, 1990.

BERALDO, A. L.; ROLIM, M.M. . Efeitos de tratamento sobre a resistência à compressão de compósitos cimento-madeira de reflorestamento. In CADIR 96- IV CONGRESSO ARGENTINO Y II CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA RURAL . **Anais...**(10), 1996.

BRESCANSIN, JANAÍNA. **Comportamento à Fratura de Compósitos de Matriz Cimentícia Reforçada com Polpa de Bambu**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais e Metalurgia)- PUC, Rio de Janeiro, 2003.

CALLISTER, W. D. Jr. *Ciência e engenharia de materiais - uma introdução*. Utah: CHOI, N. S.;TAKAHASHI, K.(1996) - **Toughness and microscopic fracture mechanisms of unfilled and short-glass-fibre-filled poly(cyano arylether)**. New York: Journal of Materials Science, v. 31, p. 731-740.

COUTTS, R. S. P. **From Forest to Factory to Fabrication**. In: Swamy, R. N. *Fibre Reinforced Cement and Concrete*.1. ed. London: E & FN Spon, 1992. p 31-47.

DALMEIDA, J. R. M. **Propriedade mecânicas de fibras de juta**. *Ciência e Cultura*, 1987. v. 39, n.11.

DEMIR H.; ATIKLER U.; BALKOSE D.; TIHMINLIOGLU F. **The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene/Fluffa fiber composites**. *Güd bahce Campus, 35430 Urla Izmir, Turkey. Composites: Part A* 37 (2006) 447. 456.

FAGURY, RÉGIA VÂNIA GUILLIOD .- **Avaliação de Fibras Naturais para a fabricação de Compósitos: açaí, coco e juta**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

FRAGA, A.N. et al. **Relationship between water absorption and dielectric behaviour of natural fibre composite materials**. Mar del Plata, Argentina: *Polymer Testing* 25 (2006) 181. 187.

FRANCO, L. A. L. **Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais**. Dissertação (Mestrado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais)- Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos , 2003.

FUJIYAMA, R. T. **Argamassa de Cimento Reforçada por Fibras de Sisal: Caracterização Mecânica e Microestrutural**. 1997. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**, LTC, Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro: S. A., 2000.

HSUECH, C.H.(1995). **Modeling of elastic stress transfer in fiber reinforced composites**. Cambridge: Trends in Polymer Science, v.3,n. 10, p. 336-641.

JUÁREZ, CÉSAR; DURÁN, ALEJANDRO; VALDEZ, PEDRO; FAJARDO, GERARDO - **Performance of Agave lecheguilla natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions** - Building and Environment 42 (2007) 1151. 1157.

KAVELINE K.G., Ermolaeva N.S., Kandachar P.V. **Investigation of stochastic properties of the natural fiber mats**. Netherlands: Composites Science and Technology 66 (2006) 160. 165.

KIM, C.W.; KIM, D.-S; KANG, S.-Y; MARQUEZ, M.; JOO, Y. L.. **Structural studies of electrospun cellulose nanofibers**. Polymer 47 (2006) 5097. 5107.

AGOPYAN, VAHAN; MOTA, LEILA APARECIDA DE CASTRO - **Caracterização de Fibras Curtas empregadas na Construção Civil**- 2007- Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil - BT/PCC/450- São Paulo.

KINLOCH, A.J., **Adhesion and Adhesives Science and Technology**, 1987,1ed. London, Chapman and Hall.

LIMA JÚNIOR, Ubirajara Marques. **Fibras da Semente do Açaizeiro (Euterpe Oleracea Mart.):** avaliação quanto ao uso como reforço de Compósitos Fibrocimentícios. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos

Materiais)- Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LIMA, PAULO ROBERTO LOPES **Análise Teórica e Experimental de Compósito reforçado com Fibra de Sisal** - Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

LOURENCI, SIDNEI - **Caracterização de Argamassas de revestimento fabricadas com materiais alternativos**. 2003. 602f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) . PGCEM, Universidade do Estado de Santa Catarina ,UDESC,LTC, 2003.

MARTINS NETO, SANDOVAL FERREIRA, **Materiais Compósitos de Argamassa de Cimento reforçado por Fibra de Sisal e Malva**, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

MARTINS G. S.; IOZZI M. A.; MARTINS M. A.; MATTOSO L. H. C.; FERREIRA F. C. **Mechanical and thermal characterization of the polyvinyl chloride-sisal fibers composites**. Polímeros, São Carlos Oct./Dec. 2004. vol.14 n.5, p 326-333.ISSN 0104-1428.

MELO NETO, A. A. **Estudo da Retração em argamassa com cimento de escória ativada**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

METHA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M., **Concreto estrutura, propriedades e materiais**. [s.l.]: Editora PINI, 1994.

NBR 5732, **Cimento Portland comum**. Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, fixa condições exigíveis no recebimento dos cimentos Portland comum(CPI e CPI-S), de classe 25, 32 e 40.

Norma Brasileira: **Associação Brasileira de Normas Técnicas** - ABNT Título: NBR11578 - Cimento Portland composto.

NUNES, NELSON LÚCIO; FIGUEIREDO, ANTONIO DOMÍNGUEZ DE, **Retração do concreto de cimento Portland** Ë 2007- Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil - BT/PCC/452- São Paulo  
PEREIRA, J. C. - **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. UFSC, PP p. 2000.

PERSSON, H.; SKARENDAHL, A. **Natural fibre concrete for roofing sheets and other purposes**. In: Sarec report. Natural fibre concrete Stockholm: Sarec, 1984. p.8-64.

PERUZZI, ANTÔNIO DE PAULO. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento Portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. Dissertação (Mestrado em Arquitetura)- Escola de Engenharia da Universidade de São Carlos, São Carlos, 2002.

PETRUCCI, E.G.R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Editora Globo, 1976. 435p.

PINO, G. R. A. **Biossorção de Metais Pesados utilizando Pó da Casca de Coco Verde (*Cocus nucifera*)**. 2005.110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais)- Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2005.

RAMAKRISHNA, G.; SUNDARARAJAN, T. **Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar Cement & Concrete Composites** 27 (2005) 575. 582.

RILEM THECNICAL COMMITIEE 49 TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites., *Matériaux et constructions* , v. 17, N. 102, Nov/Dez,1984.

RODRIGUES, JEAN DA SILVA, . **Comportamento Mecânico de Material Compósito de Matriz Poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria madeireira.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

SALES, ÂNGELA TERESA COSTA. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- PUC . Rio, 2006.

SALES, ÂNGELA TERESA COSTA; GHAVAM, KHOSROW. **Retração plástica em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu.** *CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS: HABITAÇÕES E INFRA-ESTRUTURA DE INTERESSE SOCIAL BRASIL-NOCMAT 2004.*

SANTOS, ALEXANDRE MANEIRA DOS SANTOS. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia.** 2006. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica)- Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2006.

SARMIENTO, C. R.; FREIRE, W. J. **Tratamentos aplicados ao bagaço de cana-de açúcar visando sua utilização para fins de material de construção.**In: Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como material de construção civil. p. 132-137, 1996.

SAVASTANO JR., H., WARDEN, P.G., COUTTS, R.S.P. - **Microstructure and mechanical properties of wastefibreĒcement composites.** *Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 583. 592.

SAVASTANO JR., H.; SANTOS, S.F.; RADONJIC, M.; SOBOYEJO, W.O.- **Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites.** Cement & Concrete Composites 31 (2009) 232. 243.

SAVASTANO JÚNIOR, H.; WARDEN, P.G.; COUTTS, R.S.P. **Brazilian waste fibers as reinforcement of cement-based composites.** Cement and concrete composites. England: [s.n.], v.22, p.379-384, 2000.

SAVASTANO JÚNIOR, HOLMER - **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal:** Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese apresentada a Concurso de Livre- Docência apresentada ao Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 8, 46, São Paulo, 2000.

SAVASTANO, J. H.; DANTAS, F. A. S.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras:** correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas. IPT, Boletim 67,58 p, 1994.

SEDAN D.; PAGNOUX C.; SMITH A.; CHOTARD T. **Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement:** Influence of the fibre/matrix interaction. Journal of the European Ceramic Society 28 (2007) 183. 192.

SILVA, ALUÍSIO CALDAS E - **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibra de celulose.**2002. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica da Universidade de Universidade de São Paulo, p. 145.

SILVA, FLÁVIO DE ANDRADE. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) . Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, R. V. - **Compósito de Resina Poliuretano derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais.** 2003. 157 f. Tese ( Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) . Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SOHN, M. S.; HU, X. Z.- **Comparative study of dynamic and static delamination behavior of carbon/epoxy composite laminates.** Composites, v. 26, n. 12, p. 849-858.1995.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry.** 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TOLEDO FILHO, ROMILDO D. **Free, restrained and drying shrinkage of cement mortarcomposites reinforced with vegetable fibres.** Cement & Concrete Composites 27 p. 537-546, 2005.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. **Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais, I. Relação tensão-deformação experimental e processo de fratura.** Campina Grande: Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental, Campina Grande, v. I, p.79- 88, 1997.

TOLEDO FILHO, R.D. et al. **Durability of alkalisensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites.** Cement and Concrete Composites. England: [s.n.], v.22, p.127-143, 2002.

WANG W., SAIN M., COOPER P.A. **Study of moisture absorption in natural fiber plastic composites.** Toronto, Canada: Composites Science and Technology, 66 (2006) 379. 386.

WONG, S. C.; MAI, Y. W.(1998)- **Fracture resistance and microstructures of unreinforced and fiber reinforced PA6,6/ PP/ SEBS-g-MA.** In: ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE,56., 1998, Atlanta. Proceedings 1 CD . ROM.