



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

SANDOVAL FERREIRA MARTINS NETO

**MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ FRÁGIL REFORÇADO COM FIBRAS
NATURAIS DE SISAL E MALVA: CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÕES DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS.**

BELÉM
2010

SANDOVAL FERREIRA MARTINS NETO

MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ FRÁGIL REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS DE SISAL E MALVA: CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÕES DAS PROPRIEDADES E MECÂNICAS.

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.

M379m Martins Neto, Sandoval Ferreira

Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva: caracterização e correlações das propriedades e mecânicas/ Sandoval Ferreira Martins Neto; 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. Compósito. 2. Matriz. 3. Sisal. I. Fujiyama, Roberto Tetsuo, orientador. II. Título.

CDD 19.ed. 669.94

SANDOVAL FERREIRA MARTINS NETO

MATERIAL COMPÓSITO DE MATRIZ FRÁGIL REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS DE SISAL E MALVA: CARACTERIZAÇÃO E CORRELAÇÕES DAS PROPRIEDADES E MECÂNICAS.

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: 22 de Dezembro de 2010

Banca examinadora:

_____ – Orientador
Prof. Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama
Universidade Federal do Pará / PPGEM

_____ – Membro externo
Prof. Dr. Fathi Aref Ibrahim Darwish - UFF
Universidade Federal Fluminense / PPGE

_____ – Membro interno
Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma
Universidade Federal do Pará / PPGEM

À minha esposa Adriana L. Guimarães Martins que esteve do meu lado, nesses 25 anos que estamos juntos, e em todas as minhas lutas vencidas ou perdidas, sempre me apoiando e sendo a razão pelo qual sou o que sou.

À minha filha Sammy A. Guimarães Martins, no qual procuro me esforçar ao máximo para ser exemplo de conduta na sua vida acadêmica e profissional.

À minha mãe Odete de Souza Martins, que sem ter estudo, mostrou aos seus três filhos a importância do conhecimento norteando-os no caminho da educação e na direção do sucesso, através do “aprender para poder vencer”.

Ao meu anjo da guarda Maria das Neves Pontes Barata Peres, que com sua generosidade, dedicou seu tempo em prol do meu sucesso e da minha realização profissional, me erguendo com palavras encorajadoras sempre que eu fraquejava e presenteando, minha vida, com sua sincera amizade . ”obrigado professora !”

Ao meu pai Antônio Carlos Seabra Martins (in memoriam) que, com seu talento de desenhista me influenciou na escolha da minha profissão.

Aos meus sobrinhos Anthony Yuri, Yan Souza, Matheus Souza, João Cláudio e Carlos Eduardo onde encontro muito respeito, amor e admiração dedicados a mim.

Ao meu sobrinho Marcelo Henrique Vilhena da Silva que não mediu esforços em me ajudar nessa conquista. Seu comprometimento e sua dedicação representaram todo seu respeito e amor que são oferecidos a mim e, é por isso e muito mais que somos uma família...Te amo “tiu”.

As minha irmãs Carmen Martins e Cláudia Martins por estarem comigo em todos os caminhos que escolho seguir, apoiando incondicionalmente todas as minhas ações. “Amo vocês”

E por último, e não menos importante, a minha segunda filha Mayara Cristine Souza Martins que me escolheu como pai e dedica todo seu amor, seu tempo, sua atenção e sua admiração a mim e a minha mãe.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que está sempre comigo em todos os meus passos, guardando a mim e a minha família de todo e qualquer mal. A Ti agradeço tudo que tenho e que sou meu Senhor.

Ao professor Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama pela paciência e atenção dedicados em todo o processo de desenvolvimento deste trabalho.

Ao prof. Dr. Hilton Túlio Costi (coordenador de pesquisa e pós-graduação – CPPG) do Museu Paraense Emílio Goeldi, ao apoio e excelente trabalho na análise das imagens do MEV.

À prof. Dra. Carmen Gilda e aos alunos de graduação em Engenharia Mecânica da UFPA, em especial aos alunos Michel e Izael pelo apoio na realização dos ensaios mecânicos.

Aos companheiros de trabalho e amigos Paulo Pinto e Maria das Neves, sem os quais, inviabilizaria o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Ao meu sobrinho Marcelo Henrique, que com sua atenção e doação contribuiu de maneira impar, o desenvolvimento dessa dissertação.

“Se planejamos para um ano, plantamos arroz. Se planejamos para dez anos, plantamos árvores. Se planejamos para cem anos, preparamos pessoas.”

Antigo ditado chinês

RESUMO

Este estudo propõe avaliar o comportamento mecânico dos compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de sisal e malva. Correlacionar o comportamento dos materiais com variação do tipo e do comprimento das fibras. O material base utilizado na fabricação do compósito foi cimento, areia, água e fibra de sisal e malva. Usou-se a traço 1 : 2 : 0,5 (cimento, areia e água), com adição de 1% de fibras em relação ao peso da mistura. As fibras foram previamente cortadas no comprimento de 15 mm e 25 mm e adicionadas manualmente à mistura. As correlações dos compósitos foram obtidos através do ensaio de flexão em três pontos, seguindo norma RILEM 49. As características micro-estruturais foram avaliadas através do uso do microscópio eletrônico de varredura. Os resultados obtidos indicam que a inserção de fibras na matriz cimentícia diminui a força máxima aplicada no corpo de prova, porém houve um ganho na tenacidade e na pseudo ductilidade do material após o aparecimento da 1ª trinca. As fibras mais longas mostraram melhor desempenho com um pequeno destaque às fibras de MALVA.

Palavra- chave: Compósito. Matriz. Malva. Sisal.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is evaluate the mechanical behavior of cementitious matrix composites reinforced with sisal fibers and mauve, and correlate the material's behavior with variations in the fibers types and lengths. The base material used in the manufacture of the composite was cement, sand, water and sisal fibers and mauve. It was used the trace 1: 2: 0,5 (cement, sand and water, respectively), with the addition of 1% in mass of fibers. The fibers had been previously cut in the length of 15mm e 25mm and manually added to the mix. The correlations of the composites were obtained by bending tests in three points, following the RILEM 49 norm. The micro-structural characteristics were evaluated with electron microscopy. The results show that the insertion of fibers in the cementitious matrix reduces the maximum force applied to the specimen, even tough there was an increase in the material toughness and pseudo-ductility after the appearance of the first fissure. The longest fibers demonstrated better performance with a small highlight on the mauve fibers.

Keywords: Composite. Matrix. Sisal. Mauve.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Mecanismo de falhas em compósitos reforçados com fibras	23
Figura 2 Fibras de vidro cortadas	25
Figura 3 Classificação das fibras por classe	27
Figura 4 Fibras de folha, ilustrando fibra de sisal estendidas para o processo de secagem.....	28
Figura 5 Fibras de talo, ilustrando fibra de juta estendidas para secagem.....	28
Figura 6. Fibras de caule, ilustrando fibra de cânhamo.....	29
Figura 7. Fibras de fruto: fibra de algodão.....	29
Figura 8. Plantação de sisal.	31
Figura 9. Ruptura por flexão de matriz frágil com reforço de fibra.....	35
Figura 10. Ruptura por flexão de matriz plena.	36
Figura 11 Curva carga-deflexão esquemática para compósitos com fibras de baixo módulo.....	41
Figura 12 Fibra de Malva encontrada no mercado local.....	43
Figura 13 Fibra de Sisal encontrada no mercado local	44
Figura 14 Cimento CII-Z 32.....	44
Figura 15 Areia NBR - 7214.....	45
Figura 16 Molde em madeira.....	47
Figura 17 Dimensões do molde.....	47
Figura 18 Pesagem da areia	48

Figura 19	Pesagem das fibras cortadas.....	49
Figura 20	Mistura sendo efetuada.....	49
Figura 21	Mistura com adição das fibras - Detalhe	50
Figura 22	Molde totalmente preenchido com material compósito onde já foi efetuado a vibração mecânica para o nivelamento da superfície.....	50
Figura 23	Molde sendo preenchido com material compósito	51
Figura 24	Câmara úmida onde as amostras ficaram durante o processo de cura antes da desmoldagem.	52
Figura 25	Cura submersa, onde as amostras ficaram por 28 dias, antes do ensaio mecânico.	52
Figura 26	Lixamento dos corpos de prova com lixa 100	53
Figura 27	Lixamento dos corpos de prova com lixa 180	53
Figura 28	Aferição dos CPs com uso do paquímetro	54
Figura 29	Ensaio de Flexão em 3 pontos.....	54
Figura 30	MEV - Microscópio eletrônico de varredura usado para a caracterização micro estrutural.....	55
Figura 31	Fluxograma da metodologia.....	56
Figura 32	Desenho esquemático demonstrando o ensaio para determinação da resistência à ruptura transversal	57
Figura 33	Corpo de Prova de matriz plena.....	59
Figura 34	Curva força versus deslocamento típica de corpo de prova de matriz frágil sem reforço	59
Figura 35	Secção transversal do corpo de prova da matriz plena mostra o aspecto rugoso típico da superfície de fratura de matriz frágil.....	60

Figura 37 Corpo de prova reforçado com fibra de sisal de 15mm.....	63
Figura 38 Comparativo das curvas força versus deslocamento dos corpos de prova do compósito de matriz plena e compósito reforçado com fibra de sisal 15 mm.....	64
Figura 39 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal de 15 mm apresenta bolhas de ar que geram ponto de fragilidade e possível início de fissuração no compósito descrito pela seta 01 e 03. (01 e 03 Bolhas; 02 Fissura)	65
Figura 40 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de sisal 15 mm apresenta bolhas de ar na superfície descrita pela seta 02 e nós de fibras descritas pela seta 03 gerando possível início de fissuração. (01. Fissura; 02. Ponto de fragilidade; 03. Início de fissuração no ponto de fragilidade; 04. Superfície de compressão)	65
Figura 41 Secção transversal do corpo de prova do compósito sisal 15 mm apresenta boa distribuição do material reforço em toda a secção, porém com alguns vazios ocasionados por bolhas de ar, descritas pela seta 02 e 03. (01 Superfície de compressão; 02. Ponto de fragilidade; 03. Bolha de ar; 04.Nó de fibra)	66
Figura 42 Secção transversal do corpo de prova do compósito sisal 15 mm apresenta boa distribuição do material reforço em toda a secção.	66
Figura 43 CP reforçado com fibra de malva 15 mm – MALVA15	67
Figura 44 Comparativo das curvas força versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos de matriz plena e compósito reforçado com fibra de sisal 15 mm e malva 15 mm.	69
Figura 45 Secção transversal do corpo de prova do compósito malva 15 mm não apresentou boa homogeneidade do material reforço em toda a secção, apresentou nós de fibras descritos pelas setas 02 e 03 e alguns vazios com ausência de fibra descrita pela seta 04. (0 Superfície de Compressão; 02 e 03 Nó de fibras; 04. Ausência de fibra)	70

Figura 46 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de malva 15 mm apresenta bolhas de ar na superfície descrita pela seta 02 e nós e pontes de fibras descritas pela seta 03 gerando possível início de fissuração do CP. (01. Superfície de Compressão; 02. Bolha de ar ; 03 Ponte de fibra; 04. Fissura).....	70
Figura 47 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de malva de 15 mm apresenta bolhas de ar que geram ponto de fragilidade, nós de fibras e arrancamento da fibra, descritos pelas setas 01,02 e 03, respectivamente. (01 Bolha de ar; 02. Arrancamento da fibra ; 03 Nó de fibras).....	71
Figura 48 CP reforçado com fibra de SISAL25 mm antes do ensaio	71
Figura 49 Comparativo das curvas força versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de sisal 25 mm, sisal 15 mm e malva 15 mm.	73
Figura 50 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de sisal 25 mm apresenta bolhas de ar na superfície descrita pela seta 03 e nós e pontes de fibras descritas pela seta 02 gerando possível início de fissuração do CP, descritas pela seta 01. (01. Fissura; 02. Ponte de fibra; 03. Bolha de ar; 4. Eixo do CP).....	74
Figura 51 Secção transversal do corpo de prova do compósito sisal 25 mm apresentou boa distribuição das fibras do material reforço em toda a secção.....	74
Figura 52 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal 25 mm apresenta fibra rompida pela transferência dos esforços matriz/reforço. (01. Rompimento da fibra; 02. Fissura)	75
Figura 53 Análise microscópica da fibra rompida pelo esforço de tração ocasionado pela transferência dos esforços matriz/reforço. (01. Detalhe da fibra rompida pelo esforço de tração)	75
Figura 54 CP reforçado com fibra de malva 25 mm – MALVA25 usado no ensaio de flexão em três pontos	76

Figura 55 Comparativo das curvas força versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de malva 25 mm, sisal 25 mm, sisal 15 mm e malva 15 mm.....	77
Figura 56 Macro Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de malva 25 mm apresenta pontos de fragilidade gerados pelos nós de fibras, posicionados na aresta submetida o esforço de tração descrito pela seta 03. A seta 02 descreve a possível origem da fissura no ponto de fragilidade atravessando sua secção longitudinal em aproximadamente 45°. (01. Superfície de compressão; 02. Fissura a 45°; 03. Origem da fissura no ponto de fragilidade).....	78
Figura 57 Secção transversal do corpo de prova do compósito malva 25 mm não apresentou boa homogeneidade do material reforço em toda a secção, apresentou nós de fibras descritos pelas setas 02 e 03. (01. Superfície de tração; 02. Nó da fibra; 03. Ponto de fragilidade – início de fissuração).....	78
Figura 58 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de malva 25 mm apresentou alguns arracamentos (pull-out) descritos pela seta 01 e boa trabalhabilidade das fibras sofrida pela transferência de esforços matriz/reforço, o que ocasionou seu rompimento descrita pela seta 02. (01. Arrancamento; 02. Rompimento da fibra).....	79
Figura 59 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de malva 25 mm apresentou alguns arracamentos (pull-out) descritos pela seta 02 e boa trabalhabilidade das fibras sofrida pela transferência de esforços matriz/reforço, o que ocasionou seu rompimento descrito pela seta 01. (01.Rompimento da fibra; 02.Arrancamento)	79
Figura 60 Corpo de prova HÍBRIDO15 mm.....	80
Figura 61 Comparativo das curvas força versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de sisal 15 mm, malva 15 mm e híbrido 15 mm	81
Figura 62 Secção transversal do corpo de prova do compósito híbrido 15 mm apresentou boa dispersão do material reforço em toda a secção.....	82

Figura 63 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de sisal de malva 15mm apresenta pontos de fragilidade gerados por bolhas de ar em sua superfície que sofreu o esforço de tração, descrita pela seta 02. A seta 01 descreve fissuração perpendicular a secção longitudinal do corpo de prova. (01. Fissura perpendicular a secção transversal; 02. Bolhas; 03. Espessura; 04. Superfície de tração)82

Figura 64 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal e malva 15 mm apresentou uma boa distribuição do material reforço. Próximo a zona de transição ou interface detectou-se o surgimento de microfissuras descritas pela seta 03. (01. Fibra de sisal; 02. Fibra de malva; 03. Microfissuras).....83

Figura 65 CP reforçado com híbrido de fibras sisal/malva 25mm – híbrido2584

Figura 66 Comparativo das curvas força versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de sisal 25 mm, malva 25 mm e híbrido 25 mm.85

Figura 67 Secção transversal do corpo de prova do compósito híbrido 25 mm apresentou boa distribuição do material reforço em toda a secção descrita pela seta 02. (01. Superfície de compressão; 02. Homogeneidade).....86

Figura 68 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal e malva 25 mm apresentou uma boa distribuição do material reforço. Na superfície apresentada observou-se alguns arracamentos (pull-out) descritos pela seta 03 e boa trabalhabilidade das fibras sofrida pela transferência de esforços matriz/reforço, o que ocasionou seu rompimento descrito pela seta 04. (01.Fibra de malva; 02. Fibra de sisal; 03. Arracamento; 04. Rompimento das fibras por tração)87

LISTA DE TABELA

Tabela 1 Comparação entre algumas fibras sintéticas e celulósicas (BISANDRA E ANSELL, 1992)	30
Tabela 2. Composição química provável da fibra de sisal (MEDINA, 1954)	31
Tabela 3. Propriedades físicas e mecânicas	32
Tabela 4 Propriedades Físicas e Mecânicas.....	33
Tabela 5. Composição Química da Malva (OLIVEIRA, 1989).....	33
Tabela 6. Propriedades da matriz de cimento Portland comum	36
Tabela 7. Matriz argamassa de cimento reforçado com fibras.....	48
Tabela 8. Propriedades mecânicas da matriz plena.....	60
Tabela 9. Resultados comparativos: Matriz plena x Sisal15mm.	63
Tabela 10. Resultados comparativos: Matriz plena x Malva15mm x Sisal15mm	67
Tabela 11. Resultados comparativos: SISAL25 x SISAL15 x MALVA15	72
Tabela 12. Resultados comparativos: MALVA25 x SISAL15 x MALVA15 x SISAL25.....	76
Tabela 13. Resultados comparativos: SISAL15 x MALVA15 x HÍBRIDO15.....	81
Tabela 14. Resultados comparativos: SISAL25 x MALVA25 x HIBRIDO25.....	86

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	21
2.2 REFORÇO NA FORMA DE FIBRAS NATURAIS.....	24
2.2.1 Fibras Naturais (ORGÂNICAS)	24
2.2.2 Fibras Artificiais	25
2.2.3 Classificação das fibras vegetais	25
2.2.4 Fibra de Sisal	30
2.2.5 Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais vegetais.....	31
2.2.6 Fibra de Malva.....	32
2.3 MATRIZ CIMENTÍCIA DE MATERIAIS COMPÓSITOS	33
2.3.1 Matriz.....	33
2.3.2 Zona de Transição.....	34
2.3.3 Cimento Portland.....	35
2.4 MATERIAL COMPÓSITO DE ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS.	37
2.5 ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS.....	39
2.5.1 Flexão.....	39
3 MATERIAIS E METÓDOS	43
3.1 MATERIAIS	43
3.1.1 Fibras naturais.....	43
3.1.2 Cimento	44
3.1.3 Areia	44
3.1.4 Água	45
3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.2.1 Procedimento para fabricação dos CPs para os ensaios de Flexão.	45
3.2.2 Ensaio de flexão em três pontos.....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 CORPO DE PROVA DE MATRIZ PLENA.....	58
4.1.1 Análise macro e micro estrutural.....	60

4.2 CORPO DE PROVA REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS.....	61
4.2.1 Corpo de prova com fibra de sisal de 15mm (SISAL15)	63
4.2.2 Corpo de prova reforçado com fibra de malva 15 mm.....	66
4.2.2.1 Análises macro e micro estrutural	69
4.2.3 Corpo de prova reforçado com fibra de sisal 25 mm	71
4.2.3.1 Análises macro e micro estrutural	73
4.2.4 Corpo de prova reforçado com fibra de malva 25 mm.....	75
4.2.4.1 Análises macro e micro estrutural	77
4.2.5 Corpo de prova hibrido 15mm.....	79
4.2.5.1 Análises macro e micro estrutural	81
4.2.6 Corpo de prova hibrido 25mm.....	83
4.2.6.1 Análise macro e micro estrutural	86
5 CONCLUSÃO	88
REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Mais de duas décadas de pesquisas específicas sobre as propriedades mecânicas de material compósito de matriz cimentícia (pasta, argamassa e concreto) reforçados com diversas fibras, dentre elas, as metálicas, poliméricas e minerais comprovam sua eficácia e excelência de desempenho em relação a outros materiais.

O material compósito, como definição, é composto de dois constituintes distintos e que possuem propriedades, separadamente, não satisfatória de quando combinados. É constituído por uma base denominada MATRIZ geralmente frágil, contínua, que protege, dá forma e transfere as cargas da superfície para os elementos denominados REFORÇO, que geralmente são fibrosos, dispersos e que tem uma boa capacidade de impedir que as fissuras se propaguem. Funciona como uma ponte de transferência de esforços e que, é este, quem determina as propriedades de tração e de flexão dos materiais compósitos.

Porém, pouco se sabe sobre os compósitos de fibras naturais de origem vegetal. As fibras de celulose como o sisal, coco, juta, bambu e malva, dentre inúmeras outras, abrem um leque renovável, inesgotável e alternativo de uso como elemento de reforço para compósitos de matriz frágil. No entanto, deve-se levar em consideração algumas questões relevantes ao seu uso, como sua durabilidade, reação e aderência a matriz e outros fatores que questionam sua aplicação.

Estudos podem ajudar na avaliação das propriedades de engenharia desses materiais, melhorando-os para que se tornem mais duráveis e sua aplicação seja viável e satisfatória na construção civil.

Por se tratar, o compósito, de ser um material composto pela soma de dois outros materiais de propriedades físico-química e mecânica totalmente distintas. Onde as relativas proporções de misturas interferem no resultado final do produto. É relevante pesquisar, estudar e conhecer, separadamente, todas as características de cada um dos constituintes antes do processo de combinação desses materiais.

O desempenho dos compósitos é fortemente influenciado pelas propriedades dos seus materiais constituintes, da sua distribuição, da fração volumétrica e da interação entre eles. Tais propriedades podem ser aditivas ou os componentes podem interagir em sinergismo, levando à obtenção de propriedades

do compósito que não podem ser medidas pela simples soma das frações volumétricas. (ZATTERA, 2005; SUAREZ, et al, 2003).

Suas quantidades relativas e principalmente a geometria do componente disperso, interagem nos resultados de suas propriedades. De acordo com o tipo de componente disperso, os compósitos podem ser classificados em três grupos: particulares (reforçados com partículas), fibrosos (reforçados com fibras) e compósitos estruturais (reforçado com elementos estruturais). Entende-se por partícula um componente disperso que apresenta aproximadamente a mesma dimensão em todas as direções, enquanto as fibras apresentam uma elevada relação entre seu comprimento e diâmetro. (CALLISTER JR., 1997).

Em qualquer um dos grupos de compósitos classificados por (CALLISTER JR., 1997), nos sistemas, as fases contínuas e descontínuas podem apresentar bons ou maus resultados de desempenho em suas propriedades mecânicas. Isto se deve a uma fase intermediária chamada de interface ou zona de transição ou auréola de transição que apesar de ser muito pequena, interfere no mecanismo de falha, na tenacidade na fratura e na relação tensão deformação do material (DANIEL, ISHAI 1994).

É nesta zona de transição ou interface que acontecem as interações físicas e químicas entre os materiais constituintes do compósito e que interferem no mecanismo de adesão matriz/reforço. Podendo gerar maior ou menor ancoragem do constituinte reforço à matriz.

Basicamente são 05 (cinco) os mecanismos de adesão entre os materiais constituinte de um compósito, são eles: adsorção e molhamento; interdifusão; atração eletrostática; ligação química e adesão mecânica. De todos esses mecanismos de adesão a forma mais significativa de obter um aumento da adesão entre matriz/carga (reforço) é a adsorção e a ligação química (NEVES,2006).

Avaliar a influência desses mecanismos de adesão entre os constituintes, e somar com o máximo de informação possível a comunidade científica é a premissa desse estudo que objetiva, ainda, contribuir com dados sobre o material compósito reforçado com fibras naturais de malva e sisal, avaliar suas propriedades mecânicas, sua aplicabilidade e correlacionar suas vantagens e desvantagens, como reforço, em matriz cimentícia.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral estudar o comportamento mecânico em flexão de três pontos e mecanismos de falha de compósitos de argamassa reforçada com fibras de sisal e malva distribuídas de forma randômica. Os objetivos específicos são atingidos através dos seguintes itens:

- Avaliar os efeitos da variação do comprimento das fibras no compósito (15 mm e 25mm).
- Verificar a influência da adição de fibras no comportamento carga x deslocamento quando submetidas a ensaio de flexão em 3 pontos.
- Estudar os métodos de fabricação dos materiais compósitos com matriz de argamassa de cimento reforçada por fibras vegetais naturais.
- Avaliar o comportamento mecânico e mecanismo de falha do compósito em flexão de 3 pontos através de estudos fractográficos das fraturas dos corpos de prova e correlacionar os mecanismos de falha às propriedades mecânicas obtidas nos ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Denomina-se compósito, o material originado da união de dois ou mais materiais, que combinados em diferentes proporções, formam um elemento novo com propriedades físicas e mecânicas iguais ou superiores aos dos seus componentes constituintes isoladamente.

O material compósito, como definição, é composto de dois constituintes distintos e que possuem propriedades, separadamente, não satisfatória de quando combinados. É constituído por uma base denominada MATRIZ geralmente frágil, contínua, que protege, dá forma e transfere as cargas da superfície para os elementos denominados REFORÇO que geralmente são fibrosos, dispersos e que tem uma boa capacidade de impedir que as fissuras se propaguem. Funciona como uma ponte de transferência de esforços e que, é este, quem determina as propriedades de tração e de flexão dos materiais compósitos.

Como conceitua Rodrigues, J. S. (2008) 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 fase 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 da matriz.

De forma genérica, considera-se compósito todo material com mais de um constituinte, artificialmente construído, que apresente uma significativa parcela das propriedades de todos os materiais que o integram, de forma que a combinação destes gerem propriedades satisfatórias alcançadas. Porém, não há uma definição universalmente aceita para materiais compósitos. No presente estudo, material compósito é definido em termos macro-estruturais (matrizes, partículas, fibras, etc.),

onde o compósito é uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, possuindo uma interface distinta entre si. (CALLISTER JR, 1997).

Compósito é um material obtido através de diferentes componentes, cuja associação destes, proporciona determinadas características favoráveis que, isoladamente não possuiriam.

Suas quantidades relativas e principalmente a geometria do componente disperso, interagem nos resultados de suas propriedades. De acordo com o tipo de componente disperso, os compósitos podem ser classificados em três grupos: particulares (reforçados com partículas), fibrosos (reforçados com fibras) e compósitos estruturais (reforçado com elementos estruturais). Entende-se por partícula um componente disperso que apresenta aproximadamente a mesma dimensão em todas as direções, enquanto as fibras apresentam uma elevada relação entre seu comprimento e diâmetro. (CALLISTER JR., 1997).

O desempenho dos compósitos é fortemente influenciado pelas propriedades dos seus materiais constituintes, da sua distribuição, da fração volumétrica e da interação entre eles. Tais propriedades podem ser aditivas ou os componentes podem interagir em sinergismo, levando à obtenção de propriedades do compósito que não podem ser medidas pela simples soma das frações volumétricas. (ZATTERA, 2006; SUAREZ, et al, 2003).

A resistência mecânica de materiais é fortemente afetada pela presença de defeitos, como trinca e vazios. Tais defeitos atuam como concentradores de tensões e são responsáveis pela multiplicação de tensões submetidas ao material até níveis superiores à resistência intrínseca deste (KLOSS, 2005; SUAREZ, et al, 2003).

Ao se adicionar uma carga a um polímero, para formar um material compósito, a primeira idéia é de que as propriedades do novo material formado sejam intermediárias entre as propriedades dos dois componentes. Esse comportamento previsto para a propriedade de um compósito é denominado de regra da mistura ou princípio da aditividade (YEW, et al, 2005). A equação geral descrita pela regra das misturas é dada pela equação a seguir (MARCON, 2005):

$$P = P_a V_a + P_b V_b \quad (1)$$

Onde, **P** é a propriedade do material, os índices **a** e **b** referem-se aos dois componentes e **V** é a fração volumétrica.

Quando um sistema possui componente individual com propriedades bem abaixo das propriedades esperadas pela regra das misturas, a mistura produz um compósito com características muito inferiores aos dos componentes individuais, a este comportamento damos o nome de incompatibilidade e quando o comportamento de um compósito possui propriedades superiores às propriedades esperadas pela regra das misturas chamamos este comportamento de sinergismo. (FAGURY, 2005; YEW, et al, 2005).

Essa incompatibilidade ou sinergismo, interfere nos resultados esperados para o material compósito. Já que estão diretamente ligados aos resultados dos 05 (cinco) mecanismos de falha do material, que são: arrancamento das fibras; efeito denominado como ponte de fibras; deslizamento (*fiber bridging*), em que as superfícies de uma trinca são interligadas por fibras; deslizamento interfacial matriz/fibra, seguido da ruptura das fibras; ruptura das fibras e trincamento da matriz.

A figura 1 ilustra os vários mecanismos de falha que podem ocorrer de modo catastrófico em compósitos reforçados com fibras contínuas e orientadas. Tendo como referência ilustração de COUTTS,1986.

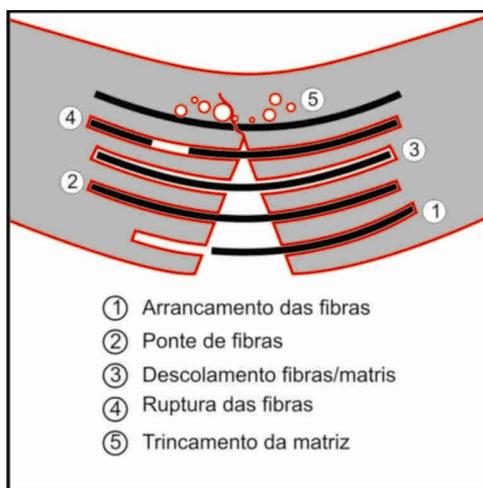


Figura 1 Mecanismo de falhas em compósitos reforçados com fibras

Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles cujo componente disperso se caracteriza por elementos fibrosos (CALLISTER JR., 1997). Como a forma fibrosa da maioria dos materiais apresenta, inerentemente, melhores propriedades de resistência e rigidez, que o mesmo material em sua forma e granel, a utilização de fibras torna-se muito interessante sob o ponto de vista estrutural. O método mais eficiente encontrado consiste em combinar um material fibroso de alta

resistência à tração e alto módulo de elasticidade com um material de baixo módulo e baixa resistência (TAYLOR, 1994; BEBER, 1999).

2.2 REFORÇO NA FORMA DE FIBRAS NATURAIS

O conceito de sustentabilidade nos encaminha rumo a descobertas de novos materiais, que não agredam o meio ambiente e que sejam renováveis. Nos materiais compósitos o uso de fibras naturais, ainda, tem um grande e longo caminho de descobertas e aprendizagem.

Por se tratar, o compósito, de ser um material composto pela soma de dois outros materiais de propriedades físico-química e mecânica totalmente distintas. Onde as relativas proporções de misturas interferem no resultado final do produto. É relevante pesquisar, estudar e conhecer, separadamente, todas as características de cada um dos constituintes antes do processo de combinação desses materiais.

A fibra por ser um material renovável, abundante, com baixo custo de produção, ter boas propriedades específicas, não ser tóxica e biodegradável, dentre outras inúmeras vantagens. Tem sido objeto e foco de muito estudo para que suas poucas desvantagens de uso sejam contornadas e sua aplicabilidade seja, de fato, uma realidade na produção em larga escala na construção civil.

As fibras podem ser genericamente classificadas em dois grandes grupos: os das fibras naturais e os das fibras artificiais (MANO, 2000).

2.2.1 Fibras Naturais (ORGÂNICAS)

As fibras classificadas como naturais podem ser sub-divididas em vegetais, animais e minerais. As fibras minerais são formadas por cadeias cristalinas com grande comprimento, como as do asbesto. As fibras de origem animal tem cadeias protéicas, enquanto as vegetais apresentam natureza celulósica.

Dentre as últimas se destacam as fibras de sisal, bambu, coco e bananeira. Além da abundância e disponibilidade, uma das principais vantagens da utilização deste tipo de fibra consiste no reduzido consumo de energia envolvido em sua produção, quando comparado ao necessário para a fabricação das fibras sintéticas. Entretanto, sabe-se que a durabilidade das mesmas pode ser comprometida pelo

caráter alcalino das matrizes cimentícias, que, ao longo do tempo, afetam sua integridade. De forma a minimizar estes efeitos as fibras podem sofrer tratamentos superficiais que a protegem da ação da água e de outros agentes agressivos, e podem ser projetados de forma a colaborar na aderência fibra-matriz.

2.2.2 Fibras Artificiais

As fibras artificiais, também denominadas de fibras sintéticas, são resultado de avanços na área de engenharia de materiais, decorrentes de pesquisas sobre a cadeia do petróleo e seus derivados, bem como do desenvolvimento da tecnologia têxtil. Dentre as fibras artificiais mais difundidas na construção civil encontram-se a aramida, a carbono, o nylon, o poliéster e o polipropileno. Estas fibras são derivadas de polímeros orgânicos e lineares, cujas moléculas possuem cadeias entre 10.000 a 100.000 átomos de carbono. Nas figuras abaixo estão representadas as estruturas atômicas da fibra de carbono e da fibra de aramida.

Apesar dos riscos à saúde que o manuseio das fibras de amianto traz ao homem, o cimento-amianto foi o primeiro material de construção civil reforçado com fibras produzido em escala industrial. A partir do conhecimento desses riscos, a engenharia voltou a preocupar-se a estudar e desenvolver novos componentes para a sua substituição. A figura 2 ilustra fibras de vidro cortadas.



Figura 2 Fibras de vidro cortadas

2.2.3 Classificação das fibras vegetais

TEZUKA (1989) estudou as características do concreto armado com fibras naturais, como as de coco, juta, sisal, etc. Segundo o autor, na produção de chapas para uso em coberturas e paredes de baixo custo, o volume e o comprimento adequado para a grande maioria das fibras naturais estão ao redor de 3% e 25 mm respectivamente.

As fibras vegetais são classificadas de acordo com a sua origem e pode ser agrupadas em fibras de semente (algodão), fibras de caule (juta, linho, cânhamo), fibras de folhas (bananeira, sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém), fibras de fruto (coco) e fibras de raiz (zacatão) (MORACI, 1994). As fibras oriundas do caule ou das folhas são as chamadas fibras duras e são as mais utilizadas como reforço em compósitos.

As fibras naturais, usadas como reforço no compósito, oferecem vantagens e desvantagens em relação ao seu uso. As vantagens podem ser com relação a sua fonte abundante e de rápida renovação, baixo custo, baixa densidade, alta propriedade específica, tem baixa abrasividade, não-tóxica e é biodegradável.

De acordo com Guimarães(1990), a primeira experiência no Brasil com a utilização de compósito cimentícios à base de fibras vegetais foi realizada no CEPED(Bahia), a partir de 1980. O objetivo do projeto era encontrar um material barato, para a produção de componentes destinados à construção de moradias, obtido através de um processo simples e que pudesse ser facilmente assimilado pelos usuários. Isto implicou na escolha de materiais naturais abundantes, como é o caso das fibras vegetais disponíveis em larga escala no nordeste do Brasil. (STANCATO, 2006).

Como desvantagens, podemos citar falta de uniformidade de propriedades físicas, que dependem da origem das fibras, da região do plantio do processo de colheita e da variação de diâmetro de acordo com o teor de absorção de umidade, que podem ou não causar o inchaço das fibras. Essa umidade pode gerar uma das falhas mais mencionadas nos estudos de compósito com fibras vegetais: A aderência(adesão) na interface matriz/fibra.

As deficiências inerentes às fibras, tais como, o baixo módulo de elasticidade, a falta de aderência adequada na interface, além de sua limitada estabilidade em longo prazo, podem ser superadas através de estudos micro-estruturais e macro-estruturais, porém é o seu desempenho em longo prazo que necessita ser assegurado. Os compósitos cimentícios à base de fibras naturais

podem contribuir, significativamente, para a melhoria da qualidade de vida da população.(STANCATO,2006)

A aplicação de fibras vegetais na construção data dos primórdios de nossa civilização. Milhares de anos atrás, os Persas já usavam as fibras associadas ao solo para construção de habitações, resultando em paredes com bom isolamento térmico e boa aparência estética (Ghavami e Tolêdo Filho 1999).

Com base em sua morfologia, as fibras podem ser classificadas em quatro classes (COOK, 1980 apud TOLÊDO, 1997). A figura 3 mostra, esquematicamente, através de um diagrama de classificação, as principais fibras de cada classe (PICANÇO, 2005)

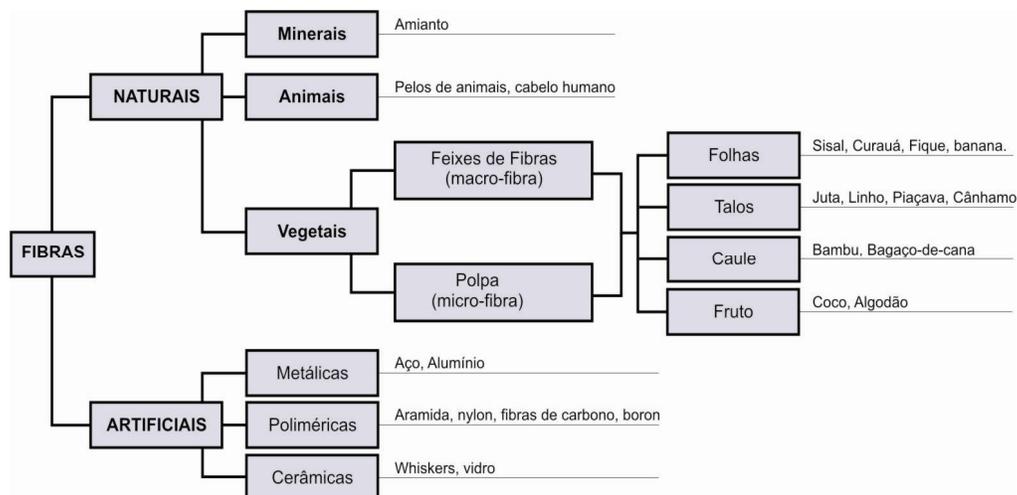


Figura 3 Classificação das fibras por classe

Fibras das Folhas - Tendo sua origem nas plantas monocotiledôneas, as fibras das folhas ocorrem em feixes com extremidades sobrepostas de tal forma que produzem filamentos contínuos através do comprimento da folha (TOLÊDO FILHO, 1997) conferindo-lhe resistência e dando suporte aos vasos condutores de água do vegetal. A figura 4 ilustra fibras de sisal no processo de secagem ao tempo.



Figura 4 Fibras de folha, ilustrando fibra de sisal estendidas para o processo de secagem

Fibras de Talo ou Tronco – Tendo origem em plantas dicotiledôneas, essas fibras ocorrem no floema, que fica na entre casca do talo. Os feixes de fibra são unidos entre si e mantidos no lugar pelo tecido celular do floema e pelas substâncias gomosas e graxas. As fibras podem ser obtidas colocando-se os talos em tanques de água quente ou deixando-os espalhados no chão para permitir que a ação das bactérias dissolva o material que envolve as fibras. O processo é seguido por secagem das fibras. A figura 5 ilustra fibras de juta durante o processo de secagem.



Figura 5 Fibras de talo, ilustrando fibra de juta estendidas para secagem

Fibras do Caule (madeira) – São as fibras curtas, grossas erigidas. Pedacos de madeira são processados em várias soluções e sujeitos a tratamentos mecânicos para extrair fibras de celulose (*Wood fibres*) de boa qualidade na forma de polpa. Como exemplo, temos fibras de bambu e de cana-de-açúcar (TOLÊDO FILHO, 1997). A figura 6 ilustra as fibras de cânhamo.

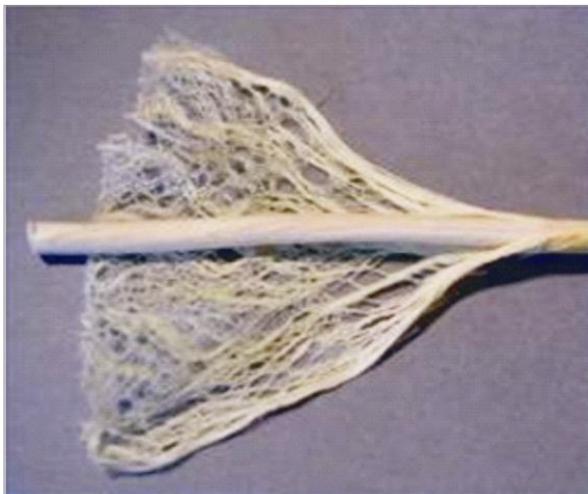


Figura 6. Fibras de caule, ilustrando fibra de cânhamo

Fibras do Fruto – Essas fibras formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas. As fibras de coco e algodão são incluídas nesse grupo (TOLÊDO FILHO, 1997). A figura 7 ilustra fibra de algodão como sendo fibra obtida a partir do fruto.



Figura 7. Fibras de fruto: fibra de algodão

As fibras oriundas das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, embora fibras de talo, do caule e do fruto também possam ser usadas. De uma maneira geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos e referenciadas como fibras “duras” enquanto as fibras de talo são

chamadas de fibras “macias” e, portanto, mais próprias para fins têxteis (TOLÊDO FILHO, 1997).

As fibras podem se dividir, de acordo com sua elasticidade, em fibras de baixo e alto módulo, definindo, assim, suas aplicações. As fibras de alto módulo melhoram a resistência do compósito, principalmente à tração, enquanto as de baixo módulo propiciam melhores resistências ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós-fissura aumentando consideravelmente sua tenacidade (AGOPYAN, 1991) quando aplicadas em teores adequados.

2.2.4 Fibra de Sisal

As primeiras plantações de sisal, classificado como *Agave sisalana perrine*, foram desenvolvidas pelos Maias, no México, antes da chegada dos europeus. Atualmente são conhecidas 57 espécies (GHAVAMI et al., 1999). A cultura sisaleira começou a ser difundida no Brasil a partir de 1920, no estado da Paraíba. O Brasil é o maior produtor de fibras de sisal, respondendo por cerca de 183.000 Mt por ano (FAO, 2002). A cultura do sisal, uma das fibras mais utilizadas mundialmente, é de extrema importância sócio-econômica para o Brasil, por ser a única economicamente viável na região semi-árida do Nordeste, com cerca de 1 milhão de pessoas que dela dependem para sua subsistência (MATTOSO et al., 1996). A tabela 1, ilustra a propriedade física, densidade e custo de fibras sintéticas e celulósicas.

Tabela 1 Comparação entre algumas fibras sintéticas e celulósicas (BISANDRA E ANSELL, 1992)

FIBRA	DENSIDADE (g/cm ⁻³)	CUSTO (U\$/g ⁻¹)
Carbono	1,88	200
Aço S	7,85	30
Vidro	2,54	3,25
Sisal	1,45	0,36
Juta	1,45	0,30
Coco	1,15	0,25

As fibras de sisal classificam-se no grupo de fibras chamadas “estruturais” cuja função é dar sustentação e rigidez às folhas. Quando se extrai das folhas, as fibras surgem na forma de feixes. Cada folha de sisal contém cerca de 3 a 5% em

peso de fibras e os outros 95 a 97% restantes são chamados de resíduos de desfibragem e podem ser utilizados como adubo orgânico e ração para animais. (MEDINA, 1954). Na tabela 2 tem-se a composição química típica das fibras de sisal.

Tabela 2. Composição química provável da fibra de sisal (MEDINA, 1954)

COMPÓSIÇÃO QUÍMICA DA FIBRA	CONSTITUINTES DA FIBRA (%)
Celulose	65,8
Hemiceluloses	12,0
Pectina	0,8
Lignina	9,9
Solúveis em água	16,2
Graxa e ceras	0,3
Umidade	10,0

A figura 8 ilustra uma planta de sisal usada para extração da fibra de sisal



Figura 8. Plantação de sisal

2.2.5 Propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais vegetais

Têm-se em forma de tabela as propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais usadas em compósitos, encontradas em literaturas técnicas apresentadas na tabela 3.

Tabela 3. Propriedades físicas e mecânicas

	Diâmetro (μm)	Comp. (mm)	Massa Espec. (kg/m^3)	Absorção máxima (%)	Resist. a tração (MPa)	Along. a ruptura (%)	Mód. de elasticidade (GPa)
Sisal	204	23,8	1387	151	458	4,31	15,2

2.2.6 Fibra de Malva

A fibra de malva (*Urena lobata linn*) tem ganhado visibilidade como planta de bom valor comercial pela praticidade e facilidade de cultivo em locais não enchacados. Ela se assemelha na cor e na resistência à fibra de JUTA. Sua resistência é considerada superior a da fibra de Kenaf (planta nativa do sul da Ásia-com características similares a da fibra de Juta) e em alguns casos, alguns tipos de Malva se equiparam ou até mesmo superam à fibra de Juta.

Na década de 70 o Pará era o maior produtor da Urena Lobata . Era produzida na região da antiga estrada de ferro bragantina e nas rodovias Belém/Brasília e Belém/São Luiz. Hoje sua produção está em todo território nacional estando entre seus melhores produtores o o estado do Pará e do Amazonas.

Diversos fatores influenciam na variação da produção de fibras secas por unidade de área como: fertilidade do solo, condições climáticas, época de sementeação, tratos culturais e processo de maceração. Em condições normais, pode-se esperar uma produção média de 1.300 a 1.500 quilos de fibra secas por hectare.

A fibra de Malva assemelha-se na cor e na textura e na resistência à de juta. A Malva é uma fibra Liberiana ocorrendo entre a camada do câmbio que envolve a medula central lenhosa do caule e a camada externa da casca. Ela é classsificada no grupo das fibras ligno-celulósica. A Malva produz fibras têxteis similares às tradicionalmente utilizadas na fabricação de papel, vestuário, barbantes e tecidos para estofados e tapetes. É usada, sobretudo, na confecção de sacaria para acondicionar produtos como açúcar, café, castanha de caju e cacau. Na tabela 4 tem-se propriedades físicas e mecânicas da fibra de malva.

Tabela 4 Propriedades Físicas e Mecânicas

	Diâmetro (μm)	Comp. (mm)	Massa Específica (kg/m^3)	Absorção máxima (%)	Resistênci a a tração (MPa)	Along. a ruptura (%)	Mód. de elasticidad e (GPa)
Malva	42,6	23,8	1374	377	160	5,2	17,4

Na tabela 5 tem-se a composição química típica das fibras de malva.

Tabela 5. Composição Química da Malva (OLIVEIRA, 1989)

SUBSTÂNCIA	%
CINZA	0,70
ÁGUA HIGROSCÓPICA	0,00
EXTRATO AQUOSO	0,00
GORDURAS E CERAS	0,00
CELULOSE	76,00
PECTINA E MATERIAIS INCRUSTADOS	0,00

2.3 MATRIZ CIMENTÍCIA DE MATERIAIS COMPÓSITOS

2.3.1 Matriz

Nos compósitos de médio ou baixo desempenho, a matriz que é a fase contínua do sistema tem o papel capsulador do elemento reforço. Além de ser o elemento protetor e envólucro do sistema compósito, ela (matriz) atua também como um agente transferidor de esforços para o elemento reforço (fibra). Neste sistema, as fases contínua e descontínua podem apresentar bons ou maus desempenhos em suas propriedades mecânicas. Isto se deve a uma fase intermediária chamada de interface ou zona de transição ou auréola de transição que apesar de ser muito pequena, interfere no mecanismo de falha, na tenacidade na fratura e na relação tensão deformação do material (DANIEL, ISHAI 1994).

2.3.2 Zona de Transição

Em compósito à base de cimento, a maior aderência fibra-matriz é conseguida por meio de melhor desempenho da zona de transição (MORRISON et al. 1988)

Define-se zona ou auréola de transição a região da pasta de aglomerante próxima à fibra, com espessura de 10 μ a 100 μ e que apresenta características diferenciadas do restante da matriz (SAVASTANO JUNIOR et al. 1994)

É nesta zona de transição ou interface que acontecem as interações físicas e químicas entre os materiais constituintes do compósito e que interferem no mecanismo de adesão matriz/reforço. Podendo gerar maior ou menor ancoragem do constituinte reforço à matriz.

Basicamente são 05(cinco) os mecanismos de adesão entre os materiais constituintes de um compósito, são eles:

- **Adsorção e molhamento:** O molhamento eficiente da fibra pela matriz remove o ar e recobre a superfície da carga com material polimérico. Deste mecanismo dependerá a tensão superficial dos componentes.
- **Interdifusão:** A formação de ligações entre a superfície matriz/fibra pode ocorrer quando as cargas são modificadas superficialmente por um determinado polímero antes de serem incorporadas à matriz. A resistência da ligação entre matriz/fibra dependerá do grau de emaranhamento molecular gerado entre o polímero matriz e a superfície da fibra modificada. A porosidade da carga tem grande influência no aumento da resistência do polímero a ser modificado.
- **Atração eletrostática:** Pode ocorrer quando as duas superfícies possuem cargas elétricas opostas, como nos casos da interação ácido/base e ligações iônicas. A resistência da ligação dependerá da densidade de cargas elétricas.
- **Ligação química:** A forma mais eficiente de adesão em compósito. Ocorre geralmente com a aplicação de agentes de acoplamento na superfície da carga, que serve como ponte entre a matriz cimentícia e a fibra. Estes materiais devem conter uma parte de sua estrutura que interage com a superfície da fibra e outra deve conter grupos orgânicos semelhantes às cadeias da matriz cimentícia. A resistência mecânica da interface depende do número e tipo de ligações químicas presentes.

- **Adesão mecânica:** É resultado do preenchimento pela matriz cimentícia dos entalhes da carga, que é na verdade rugosa, com cantos vivos, cavidades e outras irregularidades. A resistência desta ligação tende a ser baixa, a menos que haja um grande número de ângulos de reentrância na superfície da carga.

A forma mais significativa para obter um aumento da adesão entre matriz/carga é a adsorção e a ligação química. (NEVES,2006)

2.3.3 Cimento Portland

O material compósito é basicamente composto de uma fase contínua denominada matriz e uma fase dispersiva(forma e tamanho das partículas) denominada de reforço. A argamassa de cimento Portland é um material de construção durável, barato e dotado de adequada resistência à compressão e rigidez, entretanto, apresenta ruptura frágil, baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação. Uma maneira eficiente de conferir a essas argamassas maior resistência à tração, ao impacto e à fadiga, além de tenacidade e ductilidade, é a adição de fibras curtas à mistura. (TEZUKA, 1989).

Na mistura de uma matriz frágil reforçada por fibras ocorre uma ruptura lenta, promovida pela transferência dos esforços para o reforço. Com isso, a ductilidade pode ser alterada como mostra a figura 9.

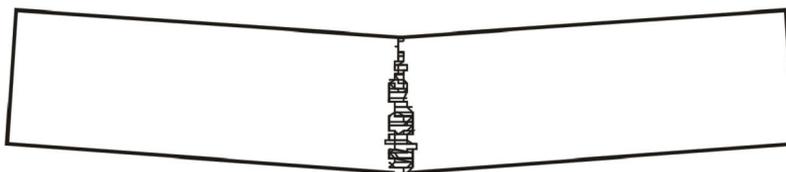


Figura 9. Ruptura por flexão de matriz frágil com reforço de fibra

Na ausência de fibra, a ruptura por flexão, ocorre de forma brusca, onde os reforços são transmitidos diretamente para a matriz como mostra a figura 10.

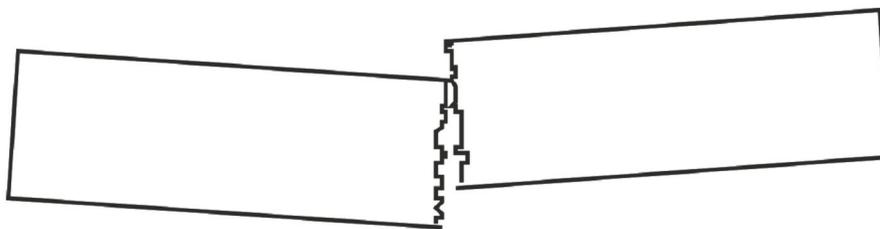


Figura 10. Ruptura por flexão de matriz plena

Temos no Brasil vários tipos de cimento Portland diferentes entre si, no que diz respeito à sua composição e a finura dos seus grãos. Abaixo apresentam-se alguns dos tipos mais comuns, como mostra a tabela 6.

As matrizes à base de cimento Portland podem se constituir de pasta, argamassa e concretos. (PICANÇO, 2005). Para este presente trabalho foram utilizados, nos compósitos estudados, uma matriz artificial cerâmica em forma de argamassa, tendo como material base o Cimento Portland CII-Z 32. A argamassa de cimento Portland foi escolhida por se tratar de um material durável, com um abaixo custo relativo, com uma boa trabalhabilidade e por apresentar bons desempenhos estruturais quando associados a algum tipo de reforço.

A tabela 6 apresenta valores de algumas propriedades físicas e mecânicas da matriz de cimento Portland comum.

Tabela 6. Propriedades da matriz de cimento Portland comum (TEZUKA, 1989)

Matriz	Massa Específica (kg/m³)	Módulo de Elasticidade (kN/mm²)	Resistência à Tração (MPa)	Deformação Ruptura (%)
Pasta	2000 a 2200	10 a 30	3 a 8	0,01 a 0,05
Argamassa	2100 a 2300	25 a 35	2 a 4	0,005 a 0,015
Concreto	2300 a 2450	30 a 40	1 a 4	0,005 a 0,015

O cimento Portland consiste de vários compostos de cálcio, mas os resultados de análises químicas de rotina são expressos em termos de óxido dos elementos presentes. Costuma-se expressar os compostos do *clínger* usando-se as seguintes abreviações.

Os constituintes fundamentais do cimento são: a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), uma certa quantidade de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidrido sulfúrico (SO₃), que é adicionado após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto, que são os componentes essenciais do cimento Portland.

Outros componentes estão presentes em menores quantidades, tais como: impurezas, óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e sódio constituem os denominados álcalis do cimento. (PERUZZI, 2002).

A argamassa de cimento Portland é um material de construção durável, barato e dotado de adequada resistência à compressão e rigidez, entretanto, apresenta ruptura frágil, baixa resistência à tração e pequena capacidade de deformação. Uma maneira eficiente de conferir a essas argamassas maior resistência à tração, ao impacto e à fadiga, além de tenacidade e ductilidade, é a adição de fibras curtas à mistura. (TEZUKA, 1989).

2.4 MATERIAL COMPÓSITO DE ARGAMASSA DE CIMENTO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS.

O uso de materiais fibrosos na geração de melhorias dos materiais compósitos é muito mais antigo que se imagina. Não é de hoje que o homem faz uso das fibras naturais como elemento de reforço em materiais frágeis a exemplo; o barro e a argila. Existem evidências em que a pelo menos 5000 anos, o uso desse material na Babilônia e na Pérsia já era bem difundido. Os tijolos de adobe com fibras vegetais, ou a utilização de pêlo animal como reforço na argamassa de enchimento de paredes, são exemplos históricos de que esse tipo de tecnologia já era bem conhecida muito antes da década de 60. Isso porque, foi nesse período que ela começou a se desenvolver nos moldes modernos, isso por causa do surgimento e aplicação de novos materiais como a fibra de vidro ou a fibra metálica.

Todo interesse por essa tecnologia se dá por se tratar de um processo de baixo custo operacional, boa disponibilidade, abundância e ser renovável. Além de ser biodegradável, isto é, está diretamente ligado as questões ambientais.

A construção civil emprega matrizes frágeis: as pastas, argamassas e concretos. Estas matrizes, na sua maioria derivadas de aglomerantes minerais, rompem-se sem deformação plástica e, apesar de resistentes a esforços de compressão, não suportam grandes solicitações de tração e carga dinâmica. Para compensar esta deficiência, outros materiais como o aço, são empregados como reforço aos materiais à base de cimento. O concreto armado pode ser descrito como exemplo clássico. (SILVA, 2002).

Matrizes com características frágeis tais como, argamassa de cimento necessita de melhorias de suas propriedades com vistas às condições de serviço às quais estão sujeitas. A adição de fibras nesse tipo de matriz melhora consideravelmente as propriedades de tração e flexão, o que no caso particular do cimento significa uma alteração das propriedades reológicas da mistura fresca, um controle da fissuração do concreto e uma mudança do seu comportamento à fratura conferindo maior capacidade de carregamento após o aparecimento das primeiras trincas. (HANNANT, 1978 apud FUJIYAMA, 1997).

De uma forma geral, as propriedades finais do compósito são fortemente influenciadas pelas características individuais de seus componentes e pelo método de fabricação do compósito, conforme os fatores a seguir: (FUJIYAMA, 1997)

- Tipo de fibras;
- Condição de uso das fibras;
- Arranjo e distribuição das fibras;
- Forma e geometria das fibras;
- Grau de aderência entre fibra e matriz;
- Fração volumétrica das fibras;
- Propriedades das fibras;
- Superfície das fibras;
- Processo de mistura;
- Método de cura.

Porém, mesmo com todo interesse por esse material, e com diversos estudos sobre o assunto, o compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais ainda tem um longo caminho a percorrer no sentido de firmar seu uso, sem restrições nas questões de sua durabilidade. Estudos comprovam sua eficácia de uso, mas ainda esbarram no processo de degradação (decomposição) do material

compósito, proveniente do reforço de ordem vegetal, acelerado por ataques químicos da matriz cimentícia à fibra natural.

A fibra vegetal sofre reações de degradação ao ser posta em contato com a água alcalina do corpo da matriz. A lignina e a hemicelulose são os compostos de fibra mais facilmente atacáveis. A água do poro em contato com a fibra, após a reação química, seria, então, neutralizada e o processo de degradação não progrediria. Porém devido a gradientes de umidade do ambiente externo, essa água pode migrar para outras áreas por difusão. Em sua antiga posição surge outra porção de água ainda não neutralizada e a fibra vegetal sofrerá nova reação química com os compostos alcalinos nele presente. Esse processo leva a uma degradação progressiva da fibra, com a perda de material de sua superfície. (PICANÇO, 2005 apud GRAM, 1983)

Além desse tipo de ataque, a fibra pode perder suas características elásticas devido a migração dos compostos hidratados do cimento para suas cavidades (lúmen e vazios das paredes), onde ocorre a mineralização, tornando-a rígida e frágil. Esses processos levam a uma perda das propriedades desejáveis do compósito, ao longo do tempo. (PICANÇO, 2005).

As alternativas para amenizar os efeitos desses processos degradantes, encontráveis na literatura técnica, constam de ações no sentido de reduzir a alcalinidade da água do poro da matriz (por uso de cimentos especiais, menos alcalinos, ou substituição da parte do cimento por pozolanas), tratamentos prévios das fibras (impregnação com sílica), redução de porosidade da matriz (fillers, compactação, processos de cura especiais, vedação externa do componente). As pozolanas usadas, por sua vez, podem vir de fontes economicamente viáveis, como é o caso do reaproveitamento de resíduos, tais como a cinza de casca de arroz, de pó de resíduo cerâmico. A escória de alto forno, subproduto da fabricação do aço, tem-se mostrado uma alternativa viável. (PICANÇO, 2005)

2.5 ENSAIO MECÂNICO DOS MATERIAIS

2.5.1 Flexão

O ensaio de flexão tem como finalidade chegar ao valo da resistência à tração na flexão das amostras sujeita a um carregamento contínuo e gradativo.

No material compósito de matriz frágil, a avaliação do comportamento mecânico sob flexão é um instrumento fundamental para análise de suas propriedades mecânicas. É de grande importância o conhecimento do comportamento do material quando submetido a este tipo de carregamento (TOLÊDO FILHO, 1997).

Com base nas curvas carga-deslocamento e conhecendo as dimensões dos corpos de prova é possível determinar a resistência do compósito a flexão (σ) e o módulo de elasticidade na flexão (E) conforme equação 2 e 3.

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

Sendo P a carga máxima atingida, L o vão entre os apoios, B e W a espessura e largura dos corpos de prova, respectivamente.

$$E = \frac{mL^3}{4BW^3} \quad (3)$$

Sendo m a inclinação da curva carga-deflexão.

Os resultados dos ensaios de flexão são expressos por meio de curvas de carga versus deflexão, sendo a mesma utilizada tradicionalmente na determinação das propriedades principais dos compósitos fletidos, como tenacidades, carga de fissuração e capacidade portante. A forma da curva carga-deflexão é definida pelo tipo de fibra, pelo volume e orientação do esforço. Para fibras curtas do sisal, ela pode ser esquematizada como mostra a figura 11, e pode ser dividida em duas partes: região I, que é a zona elástica, antes da fissuração, e região II, que é a zona inelástica até a ruptura.

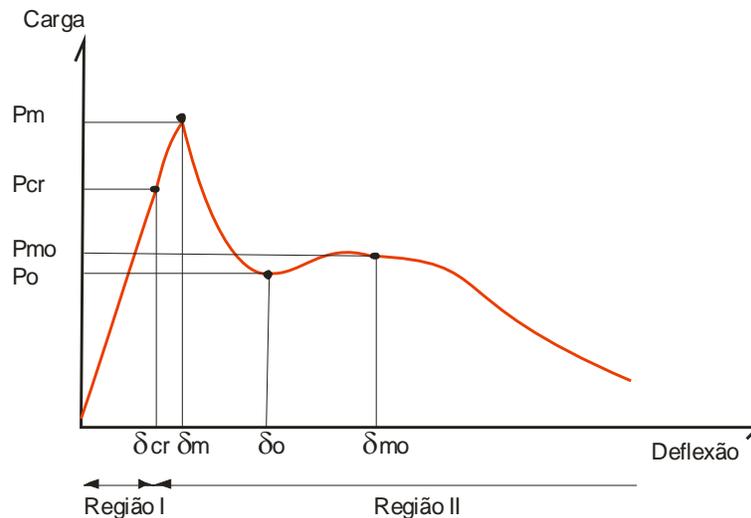


Figura 11 Curva carga-deflexão esquemática para compósitos com fibras de baixo módulo

Pcr: carga de fissuração

Pm: carga máxima

Pmo: carga máxima pós-pico

Po: carga pós-pico

Na região I, considera-se que a matriz controla o comportamento do compósito. De forma teórica, o fim da região I é definido quando acontece a fissuração e a curva desvia da linearidade. Muitas vezes é difícil estabelecer experimentalmente este ponto e a carga de fissuração, Pcr, é muitas vezes associada à carga máxima, Pm, atingida antes da transferência de tensões para as fibras. Como a carga de tensão é usualmente utilizada para o cálculo de tenacidade dos compósitos, sua determinação correta é fundamental para caracterização dos compósitos.

Na região II, as fibras comportam quase toda tensão de tração contando com uma pequena contribuição da matriz durante a propagação inicial da fissura. Quando se utiliza fibra curta, o comportamento da região II fica modificada conforme comenta (TOLEDO FILHO et al, 2000).

Após a fissuração há uma redistribuição de tensões e a carga é transmitida da matriz para as fibras, até atingir a deflexão (σ). Logo após, as cargas passaram a ser resistidas pelas fibras, podendo aumentar um pouco a capacidade de suporte da viga até atingir um valor máximo pós-pico, Pmo. A partir deste ponto, há uma

redução suave da capacidade portante até a ruptura do compósito, que é caracterizada pelo arrancamento das fibras da matriz na região tracionada. A carga máxima atingida pós pico não supera a carga de pico, ou seja, $P_{mo} < P_m$.

Para alguns compósitos, o ganho da resistência após a redistribuição de tensões é mais significativo, e a carga máxima resistida é maior que a carga de pico. Esse comportamento, com $P_{mo} > P_m$ é comum para compósitos reforçados com grande quantidade de fibras (ASTM 544.4R-OO, 1988), ou com fibras longas e alinhadas, mesmo quando se utiliza fibras de baixo módulo como sisal (TOLEDO FILHO et al, 2000).

3 MATERIAIS E METÓDOS

3.1 MATERIAIS

Inicialmente para os estudos preliminares e pré-avaliativo do comportamento físico e mecânico do objeto, o corpo de prova possui em sua composição: fibra natural, cimento, areia e água. Os materiais foram escolhidos de acordo com suas características específicas, facilidade de aquisição e baixo custo.

3.1.1 Fibras naturais

Dentre inúmeras fibras naturais existentes no mercado, optou-se pelas fibras vegetais de sisal e malva seca para que estes trabalhem como reforço no material compósito.

Estes materiais foram escolhidos por se tratar de componentes disponíveis em abundância no mercado de Belém, pela viabilidade e aplicabilidade na construção civil e por serem materiais de baixo custo de produção e inesgotável pela sua possibilidade de cultivo fácil. As figuras 12 e 13 ilustram um feixe de fibra natural de malva (encontrada no mercado local) e fibras de sisal respectivamente.



Figura 12 Fibra de Malva encontrada no mercado local



Figura 13 Fibra de Sisal encontrada no mercado local

3.1.2 Cimento

O cimento utilizado neste trabalho é o CP II Z 32 (NBR 11578), cimento Portland composto com pozolana (6 a 14%), devido ter diversas possibilidades de aplicação e por isso é um dos cimentos mais utilizados no Brasil. Os materiais pozolânicos podem melhorar significativamente as propriedades dos compósitos, e também sua durabilidade. Figura 14 ilustra a descrição que vemos nas embalagens de cimento CP II-Z 32.



Figura 14 Cimento CP II-Z 32

3.1.3 Areia

Para se obter uma mistura o mais homogênea possível em sua estrutura final e possuir o mínimo de vazios. Determinou-se utilizar uma composição de quatro

granulometrias diferentes; 0,3, 0,5, 0,6, 1,2, conhecida como areia perfeita ou normatizada na construção civil. A figura 15 mostra embalagem de areia adquirida através do IPT, normatizada de acordo a norma brasileira NBR-7214.



Figura 15 Areia NBR - 7214

3.1.4 Água

Para se obter uma boa homogeneidade durante o processo de mistura dos constituintes, optou-se como facilitador da mistura a água potável. O fator água/cimento usado experimentalmente, foi de 0,5 quantidade de água para 1,0 quantidade de cimento em peso, no traço SEDAN *et al*, (2008). Fornecimento através da concessionária da rede pública de abastecimento.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Procedimento para fabricação dos CPs para os ensaios de Flexão.

A técnica de mistura respeitou a relação cimento/areia em peso de 1:2 (SARMIENTO *et al*, 1996). Foi definido a porcentagem em peso da fibra em relação a mistura do compósito de 1% e a relação água/cimento/areia. Para este primeiro momento definiu-se que para um melhor controle do processo de fabricação do material compósito, as seguintes etapas deveriam ser seguidas.

A diferenciação dos compósitos com e sem fibra, foi feita com base na matriz cimentícia sem reforço.

Etapa 1 - Seleção dos Materiais: Esta etapa está bem descrita nos itens 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, onde descreve cada um dos componentes.

Etapa 2 - Corte das Fibras: Após definido a escolha do tipo de fibra, iniciou-se esta etapa pré determinando-se cortes de medidas padrão de 15mm e 25mm para cada tipo de ensaio e mistura. No corte padrão das fibras, foi desenvolvido um processo de matriz, para se conseguir uma precisão próxima do ideal. As matrizes foram inicialmente produzidas (desenhadas) no COREO DRAW X4, no formato A4 para que em seguida tiras de 1cm, fossem unidas as fibras de sisal e malva e quando determinado o tamanho ideal para o compósito, eram feitos os cortes.

Etapa 3 – Confeção dos moldes: Os moldes foram fabricados em marcenaria, em madeira maciça com encaixes para facilitar uma das etapas de fabricação dos CPs que seria a desmoldagem. A preparação das peças (moldes), para fabricação dos corpos de prova, foram baseadas em parâmetros conforme Norma Rilem 49 que trata de matrizes cimentícias e fibras vegetais. Para os ensaio de flexão em três pontos foram confeccionados moldes de madeira de seção retangular de 100mm x 25mm x 300mm como mostra as figuras 16 e 17, onde a figura 16 ilustra fisicamente um dos moldes que foram usados na fabricação dos corpos de prova e a figura 16 ilustra o desenho esquemático com as dimensões dos moldes..



Figura 16 Molde em madeira

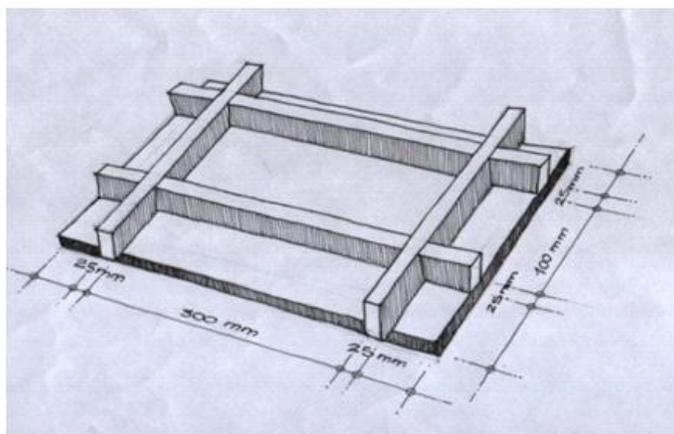


Figura 17 Dimensões do molde

Etapa 4 - Pesagem dos Materiais: Nesta etapa os componentes foram individualmente pesados e devidamente acomodados em embalagens separadamente um a um. A fração constituinte do compósito foi determinada experimentalmente baseando-se inicialmente em parâmetros encontrados na literatura.

a) Pesagem do Cimento Portland (aglutinante): Baseado na literatura determinou-se como medida parâmetro para o aglutinante o peso de 600g por traço. A relação em peso cimento/areia, utilizada nesta técnica de mistura é do traço 1:2 segundo (SARMENTO, 1996)]. A tabela 7 mostra a relação de cimento e areia segundo alguns autores.

Tabela 7. Matriz argamassa de cimento reforçado com fibras.

Relação cimento e areia	Autores
1:1,5 de cimento, areia.	SAVASTANO,2000
1:1, de cimento, areia.	SILVA,2004
1:2, de cimento, areia.	SARMENTO et al, 1996

b) **Pesagem da Areia (agregado miúdo):** Como já mencionado no item 3.1.3, a areia está subdividida em 4 (quatro) distintas granulometrias, porém de medidas de pesos iguais. Para cada medida, em peso, de cimento temos duas medida de areia. Onde se tem na mistura 600g de cimento, tem-se 1200g de areia divididos igualmente em 4 (quatro) subdivisões diferentes, isto é, 300g para cada uma granulometria de areia . A figura 18 ilustra o processo de pesagem da areia.

**Figura 18 Pesagem da areia**

c) **Pesagem da Fibra (reforço):** Para este componente, determinou-se adicionar a mistura um percentual de 1,0% em peso de fibras, em relação a massa do compósito, isto é, a soma dos constituintes do material compósito é de 2100g. Definindo, dessa maneira 21g em peso do material reforço (fibra), inserido na mistura para posterior ensaio e análise de comportamento mecânico.

d) **Pesagem da Água (facilitador da mistura):** O fator água/cimento usado experimentalmente, foi de 0,5 quantidade de água para 1,0 quantidade de cimento em peso, no traço (SEDAN *et al*, 2008). Definido, dessa maneira, em 300g o peso

do facilitador da mistura em relação ao cimento que é de 600g por traço. Figura 19 ilustra as fibras cortadas e em processo de pesagem.

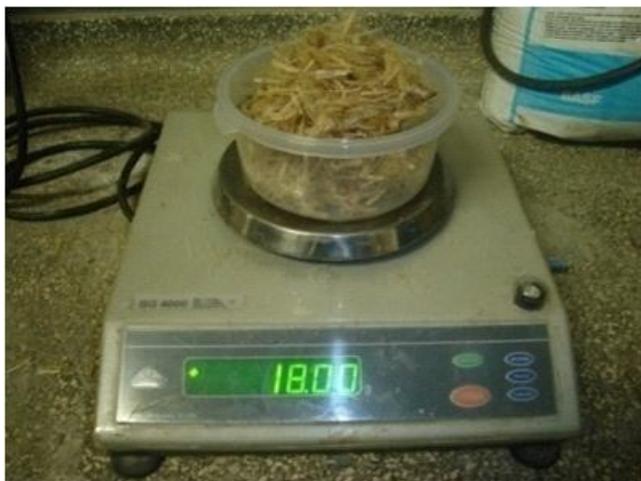


Figura 19 Pesagem das fibras cortadas

Etapa 5 - Mistura dos Materiais: Os materiais constituintes, assim que devidamente pesados, foram cuidadosamente homogeneizados. Este cuidado é para que um dos materiais constituintes (material reforço) não se danificasse com o processo. Com essa técnica de mistura sugerida, acredita-se obter uma argamassa homogênea e o mais íntegra possível. As figuras 20 e 21 ilustram a etapa de homogeneização da mistura. A figura 19 ilustra o processo de mistura manual da areia/cimento/água e a figura 20 mostra o processo de mistura após a adição das fibras.



Figura 20 Mistura sendo efetuada



Figura 21 Mistura com adição das fibras - Detalhe

Etapa 6 - Moldagem do Corpo de Prova: Durante o processo de envasamento, procurou-se observar o preenchimento total do molde, retirar as bolhas de ar alojadas na argamassa através da vibração mecânica. Posicionar o molde sobre uma superfície plana e nivelada para que não ocorra, durante o processo de aferição, diferença na medição das secções do corpo de prova. conforme pode-se observar nas figuras 22 e 23. A figura 22 mostra o molde sendo preenchido até atingir o volume total do molde. A figura 23 ilustra o molde preenchido com material compósito onde já foi efetuado a vibração mecânica bem como o nivelamento da superfície da amostra.



Figura 22 Molde sendo preenchido com material compósito



Figura 23 Molde totalmente preenchido com material compósito onde já foi efetuado a vibração mecânica para o nivelamento da superfície

A preparação das peças (moldes), para fabricação dos corpos de prova, foram baseadas em parâmetros conforme Norma Rilem 49 que trata de matrizes cimentícias e fibras vegetais. Para os ensaio de flexão em três pontos foram confeccionados moldes de madeira de seção retangular de 100 mm x 25 mm x 300 mm.

Etapa 7 - Desmoldagem do Corpo de Prova: Os corpos de prova foram desmoldados, após 24h de cura em uma câmara úmida.

Etapa 8 – Cura do Corpo e Prova : Após o envasamento, o corpo de prova descansa em uma câmara úmida de superfície plana e nivelada por 24h. É retirada do local de descanso para desmoldagem. Após desmolde os CPs retornam a cura, agora através do processo denominado “cura submersa” totalizando um período de espera (descanso) de 28 dias, até que toda esta etapa de cura se complete. Nas figuras 24 e 25 a imagem das duas câmaras usadas no processo de cura dos corpos de prova. A figura 24 ilustra a câmara úmida onde as amostras permaneciam durante o processo de cura antes da desmoldagem. A figura 25 ilustra os reservatórios onde as amostras ficaram por 28 dias, após as quais eram ensaiadas.



Figura 24 Câmara úmida onde as amostras ficaram durante o processo de cura antes da desmoldagem



Figura 25 Cura submersa, onde as amostras ficaram num tambor com água por 28 dias, antes do ensaio mecânico

Etapa 9 – Regularização da superfície do Corpo de Prova: Durante o processo de desmoldagem, algumas imperfeições aparecem. A regularização das superfícies danificadas mantém uma unidade nas dimensões de todos os corpos de prova (CPs). Figuras 26 e 27 mostram a etapa de regularização dos CPs, através do processo de lixamento. A figura 26 mostra a etapa onde foi usada uma lixa 100 para a retirada das rebarbas grosseiras, e na figura 27 o uso da lixa 180 para a remoção das rebarbas menores.



Figura 26 Lixamento dos corpos de prova com lixa 100



Figura 27 Lixamento dos corpos de prova com lixa 180

Etapa 10 – Aferição das secções do Corpo de Prova: As aferições determinam a variabilidade das medidas e descrevem se houve falha durante o processo de envasamento, cura, moldagem ou desmoldagem. A figura 28 ilustra o processo de medição dos corpos de prova com o uso do instrumento de medição paquímetro.



Figura 28 Aferição dos CPs com uso do paquímetro

Etapa 11 – Ensaio e Caracterização: Após as dez etapas concluídas, os CPS estão prontos para os ensaios. A avaliação do comportamento mecânico sob flexão, do material composto, é um instrumento fundamental para análise de suas propriedades mecânicas. A figura 29 ilustra o procedimento de ensaio de flexão em 3 pontos.

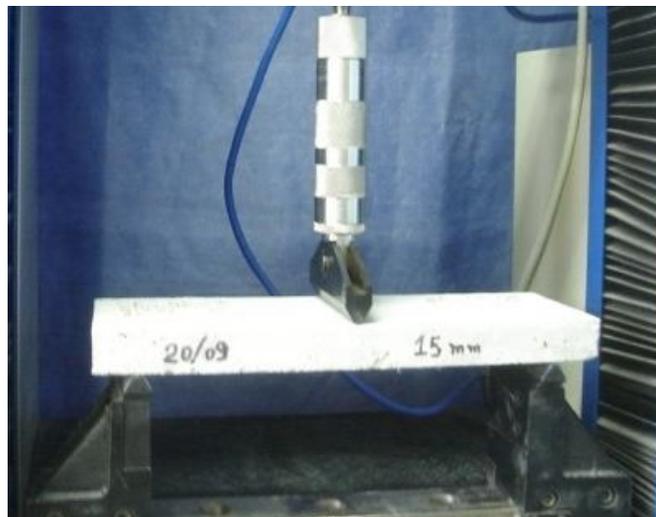


Figura 29 Ensaio de Flexão em 3 pontos

Etapa 12 – MEV: Microscópio Eletrônico de Varredura.

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300.000 x) e resolução. As imagens

fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados. O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV. Essa variação de voltagem permite a variação da aceleração dos elétrons, e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada. A figura 30 ilustra o microscópio eletrônico de varredura usado, no estudo, para a caracterização micro estrutural dos corpos de prova.



Figura 30 MEV - Microscópio eletrônico de varredura usado para a caracterização micro estrutural

As imagens foram obtidas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, utilizando-se um microscópio eletrônico LEO modelo 1450VP. As amostras foram em suporte de alumínio com 12 mm de diâmetro. Em seguida a fim de se tornarem condutivas, foram metalizadas com Au por 2h3”, o que deposita sobre a amostra uma película com espessura média de 15nm. As imagens foram geradas por detecção de

elétrons secundários, utilizando-se aceleração de voltagem entre 12 e 15 kV e distâncias de trabalho variáveis entre 10 e 15 mm.

Para melhor esclarecimento, a figura 31 abaixo apresenta o fluxograma das etapas que foram necessárias a produção dos corpos de prova para os ensaios de flexão que.

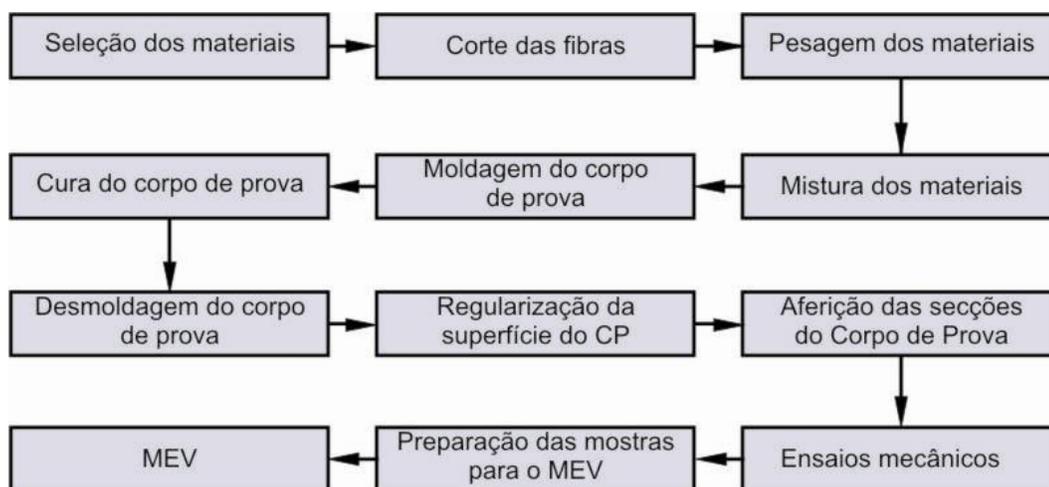


Figura 31 Fluxograma da metodologia

3.2.2 Ensaio de flexão em três pontos

O equipamento, usado, é uma 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, com célula de carga de 500kgf, onde o corpo de prova é posicionado, de forma que, a carga é aplicada no centro do mesmo, com uma velocidade de 4mm/min, a figura 5 apresenta o esquema de ensaio. Os resultados obtidos são representados na forma de gráfico (carga x deslocamento). A representação esquemática dos esforços e apoios do equipamento sobre o corpo de prova e o equipamento utilizados nos ensaios, estão ilustrados pelas figuras 32 e 33 respectivamente.

- Desenho esquemático demonstrando o ensaio para determinação da resistência à ruptura transversal. Onde:

A – Ponto de aplicação do Carregamento;

- B – Espessura do corpo de prova;
- C – Ponto de apoio do corpo de prova.
- L – Distância entre apoios.
- W – Largura do corpo de prova.
- P – Carga aplicada no corpo de prova

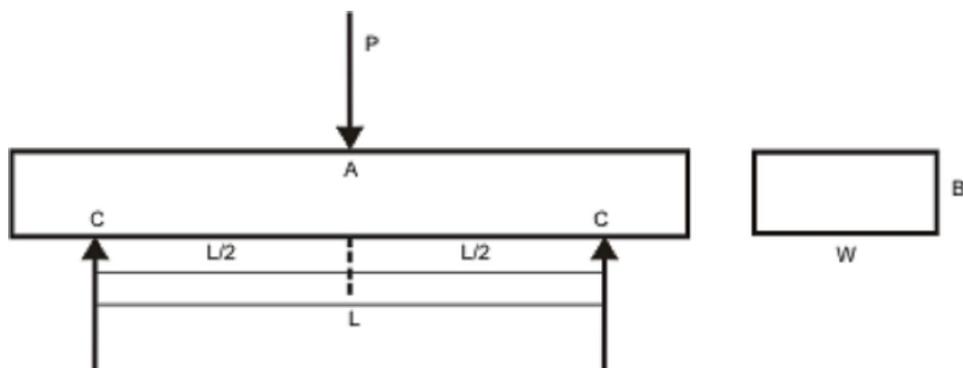


Figura 32 Desenho esquemático demonstrando o ensaio para determinação da resistência à ruptura transversal

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados, nesta etapa do estudo, os resultados das propriedades mecânicas adquiridas ou perdidas diante das variáveis de comprimento e tipo de fibra usada como reforço no material compósito.

Os aspectos microestruturais e fractográficos foram avaliados através de imagens obtidas através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). E para as análises do comportamento mecânico fez-se uso do ensaio de flexão em três pontos, onde os resultados são representados na forma de gráfico carga-deslocamento. Esses ensaios têm como finalidade representar numericamente o valor da resistência do corpo de prova, quando sujeito ao esforço de tração na flexão.

De posse das variáveis, utilizou-se da seguinte classificação para os ensaios de análise dos resultados:

- Corpo de prova de matriz plena – MATRIZ PLENA.
- Corpo de prova com fibra de sisal 15 mm – SISAL15
- Corpo de prova com fibra de sisal 25 mm – SISAL25
- Corpo de prova com fibra de malva 15 mm – MALVA15
- Corpo de prova com fibra de malva 25 mm – MALVA25
- Corpo de prova com fibra híbrida 15 mm – HÍBRIDO15
- Corpo de prova com fibra híbrida 25 mm – HÍBRIDO25

4.1 CORPO DE PROVA DE MATRIZ PLENA

Neste estudo foram ensaiados 10 corpos de prova de argamassa de cimento sem reforço de fibras, sob flexão em três pontos, nas dimensões 300x100x25mm como mostra a figura 33.

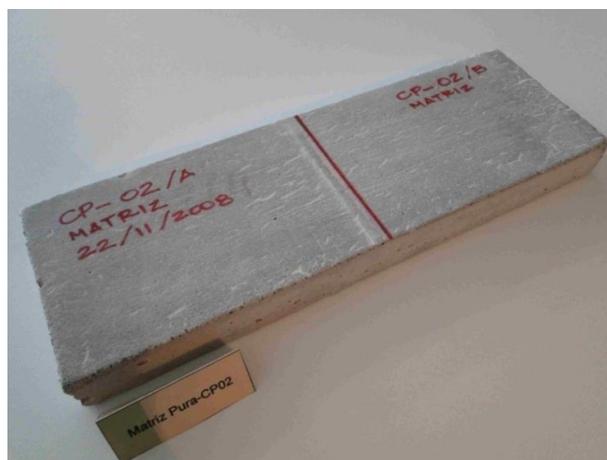


Figura 33 Corpo de Prova de matriz plena

Considerado um material que apresenta um bom comportamento mecânico quando se trata de compressão, mas frágil quando se refere à tração em flexão estas são as características da matriz plena. O diagrama carga x deslocamento da figura 34, mostra o comportamento típico do corpo de prova de matriz frágil. Os CPs apresentaram resultados similares. O ensaio da matriz plena apresentou um comportamento mecânico típico de matrizes frágeis, com carga crescente até atingir uma tensão máxima de 7,52 MPa, que conduziu o corpo de prova a uma ruptura brusca e total da sua secção transversal.

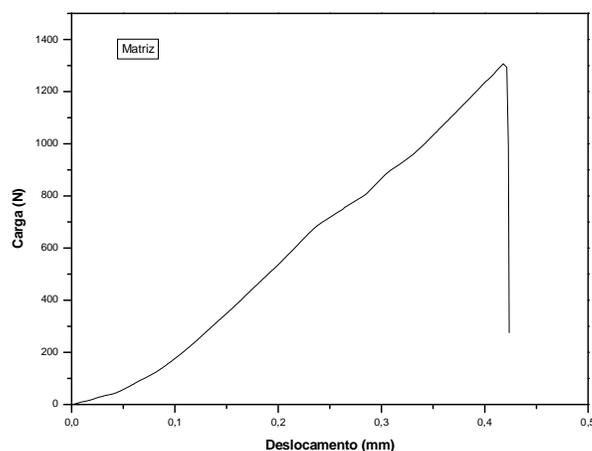


Figura 34 Curva Carga versus deslocamento típica de corpo de prova de matriz frágil sem reforço

As leituras, dos resultados mostraram que a matriz plena apresenta o melhor desempenho na resistência a primeira fissura em comparação com o compósito da

mesma matriz. “A maior resistência a primeira fissura da matriz está diretamente associada à sua melhor compactação durante o processo de prensagem. O resultado é um material mais denso, com menor porosidade e, conseqüentemente, mais resistente (LIMA et. al, 2007). É oportuno observar que, neste estudo, não houve prensagem do CP mas, uma vibração mecânica com resultados de um bom adensamento, acomodação dos materiais constituintes, a expulsão de bolhas de ar do seu interior e uma quantidade pequena de água. A tabela 8 mostra o resultado obtidos no ensaio de flexão em três pontos, através das propriedades mecânicas da matriz plena.

Tabela 8. Propriedades mecânicas da matriz plena

Tipo de Amostra	Força Máxima Média (N) (desv. padrão)	Resistência Máxima em flexão (MPa)	Módulo MPa
Matriz Plena	1278 ($\pm 53,53$)	7,66 ($\pm 0,32$)	11030(± 753)

4.1.1 Análise macro e microestrutural

Foi observado tanto em análise macro como em microestrutural que o corpo de prova com MATRIZ PLENA apresenta uma boa homogeneidade, uma boa coesão entre seus constituintes e com o processo de vibração mecânica o material apresentou poucos pontos críticos de enfraquecimento como bolhas de ar no seu interior, o que lhe conferiu uma boa densidade e coesão dos materiais constituintes (aglomerantes e agregados) areia e cimento. O que refletiu na carga máxima atingida pela matriz plena de 1278N, onde gerou o rompimento instantâneo do material, como mostra a figura 35 e figura 36. Nas figuras 35 e 36 é possível observar o aspecto rugoso apresentado pela superfície de fratura após o ensaio de flexão em três pontos. O aspecto rugoso acontece devido as porosidades e também devido ao arrancamento ou quebra dos grãos de areia e do composto areia/cimento.



Figura 35 Seção transversal do corpo de prova da matriz plena mostra o aspecto rugoso típico da superfície de fratura de matriz frágil

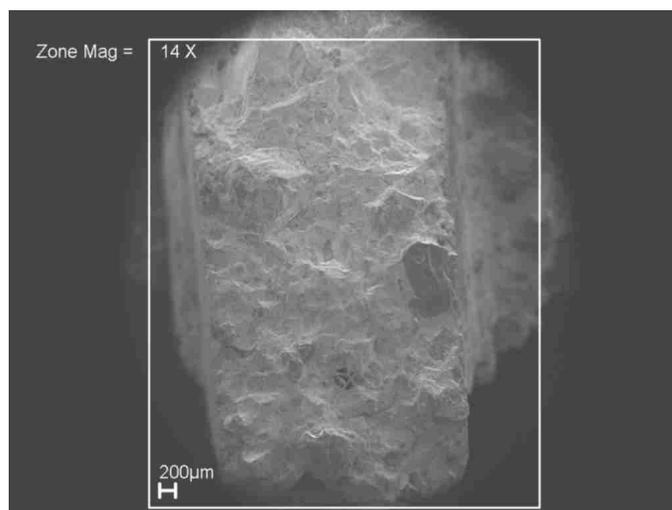


Figura 36 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena apresenta rugosidades típicas da superfície de fratura de matriz frágil

4.2 CORPO DE PROVA REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS

Este estudo avalia as performances das fibras de sisal e malva, quando usadas separadamente como reforço no material compósito. E suas performances juntas originando um material híbrido sisal/malva. Foram analisados 66 corpos de prova distribuído em 10 CPs de fibra de sisal 15 mm (SISAL15); 10 CPs de fibra de sisal de 25 mm (SISAL25); 08 CPs de fibra de malva de 15 mm (MALVA15); 09 CPs

de malva de 25 mm (MALVA25); 09 CPs de híbrido de 15 mm (HIBRIDO15), e por fim 10 CPs de híbrido de 25 mm (HIBRIDO25). As fibras foram misturadas a argamassa manualmente, até se tornarem uma massa homogênea.

As análises, a seguir, ratificaram estudos anteriores sobre o desempenho favorável do material compósito de matriz frágil reforçados com fibras naturais em especial as de sisal e malva. A adição dessas fibras, na matriz cimentícia, alterou positivamente o desempenho mecânico dos CPs quando ensaiados sob flexão em três pontos. Os corpos de prova de matriz plena sofreram ruptura brusca enquanto os CPs reforçados com fibras curtas desempenharam um comportamento mecânico favorável pós fissuração. Conferindo ao compósito uma tenacidade e uma pseudo ductilidade já esperada.

Ao estudar as propriedades das fibras no concreto verificou-se que as matrizes frágeis, quando reforçadas com fibras de módulo de elasticidade similar ou inferior ao da matriz, como são as fibras plásticas comuns e as fibras vegetais, não alteram as propriedades da matriz antes da ruptura, porém após isso, as fibras, se estiverem em quantidades suficientes, poderão suportar as cargas aplicadas conferindo, ao compósito, propriedades dúcteis (AGOPYAN, 1993).

4.2.1 Corpo de prova com fibra de sisal de 15mm (SISAL15)

Para os ensaios de flexão em 3 pontos, foram confeccionados 10 corpos de prova nas dimensões 300 x 100 x 25 mm, com adição de 1%, do peso do CP, em fibra de sisal de 15 mm. Figura 38 seguindo a norma Rilem 49.

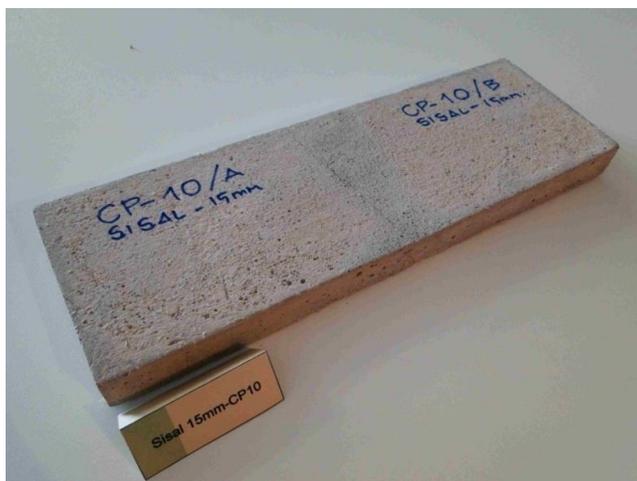


Figura 37 Corpo de prova reforçado com fibra de sisal de 15mm

O desempenho mecânico do sisal 15 apresentou uma resistência à flexão inferior a matriz plena. A tensão máxima atingida pelo SISAL15 foi de 5,31MPa, enquanto que na MATRIZ PLENA a tensão máxima foi superior em 44,18% atingiu um pico de 7,66MPa. Como mostra a tabela 9.

Tabela 9. Resultados comparativos: Matriz plena x Sisal 15mm.

Tipo de Amostra	Força Máxima Média (N) (desv. padrão)	Resistência Máxima em flexão (MPa)	Módulo (MPa)
Matriz Plena	1278 (±53,53)	7,66 (±0,32)	11030(±753)
Sisal 15mm	886,1 (±107,5)	5,31 (±0,645)	7990 (±336,9)

Em outros estudos, onde foram usadas fibras longas e orientadas unidirecional, indicaram que o material compósito acrescido de 1% do volume de fibras cortadas de sisal, sofreram redução de 30% da resistência à tração na flexão em relação ao padrão, aos 14 dias de idade. (SAVASTANO JR. LIA LORENA, 2000 APUD RAS TECHNICAL BULLETIN, 1994). No caso estudado, com o acréscimo de 1% do peso da mistura (cimento, areia, água) e aos 28 dias de cura, obteve-se uma redução da carga máxima da ordem de 30,67% em relação à matriz plena.

Mesmo com essa significativa redução de carga máxima aplicada, o SISAL15 mostrou uma capacidade, positiva, de absorção de energia, ao contrário do MATRIZ PLENA que apresentou um colapso imediato.

Verifica-se que a adição de fibras curtas de sisal reduzem a resistência a tração, mas aumentam o módulo de elasticidade e a deformação última do compósito, com relação à matriz (LIMA et al, 2005).

Os resultados comparativos entre os dois CPs mostraram que o carregamento do SISAL15 foi de 886,1N, cerca de 69,33% da força aplicada à MATRIZ PLENA. No entanto o compósito apresentou uma melhoria significativa na pseudo - ductilidade e tenacidade em relação à matriz plena, como mostra a curva da figura 38.

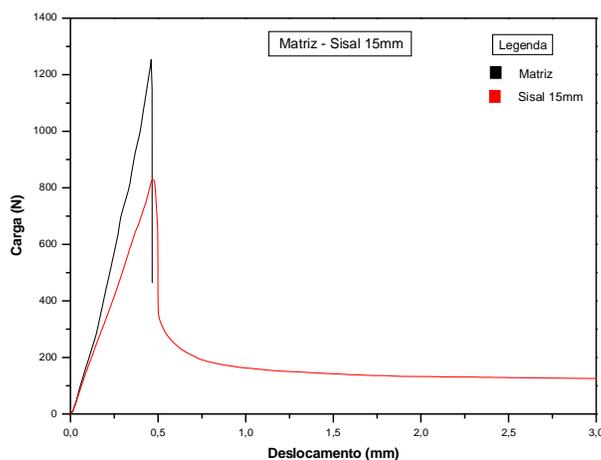


Figura 38 Comparativo das curvas carga versus deslocamento dos corpos de prova do compósito de matriz plena e compósito reforçado com fibra de sisal 15 mm.

Essa redução na carga máxima atingida pelo SISAL15 se dá pela introdução do material reforço na forma de fibras. Houve um aumento significativo no número de vazios ocasionado por nós de fibra no interior da argamassa além do aumento no número de bolhas de ar presas no interior do CP (mesmo havendo vibração em todos CPs para a retirada das bolhas). Nas figuras 39, 40, 41 e 42 temos a macro e microestruturas do compósito onde se observa a relevância dos vazios ocasionados pelos nós de fibras e pelas bolhas de ar aprisionados próximos aos grãos de areia, gerando, com isso, pontos de fragilidade dos compósitos. As figuras 39, 40, 41 e 42 ilustram a microscopia da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra

de sisal de 15 mm que apresenta bolhas de ar que geram ponto de fragilidade e possível início de fissuração no compósito.

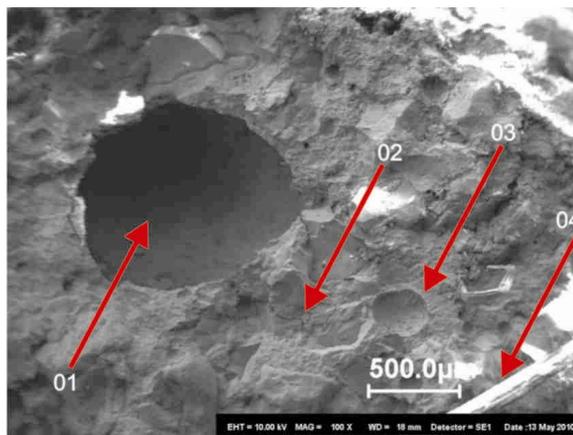


Figura 39 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal de 15 mm apresenta bolhas de ar que geram ponto de fragilidade e possível início de fissuração no compósito descrito pela seta 01 e 03. (01 e 03 Bolhas; 02 Fissura)

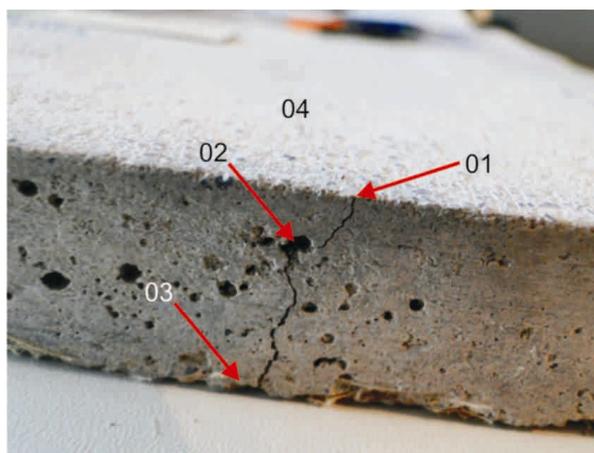


Figura 40 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de sisal 15 mm apresenta bolhas de ar na superfície descrita pela seta 02 e nós de fibras descritas pela seta 03 gerando possível início de fissuração. (01. Fissura; 02. Ponto de fragilidade; 03. Início de fissuração no ponto de fragilidade; 04. Superfície de compressão)

O que se pode observar, no SISAL15, é uma boa homogeneização matriz/fibra. Existe uma boa distribuição do material reforço em toda a secção transversal do CP, porém vazios ocasionados por bolhas de ar, o que geram pontos críticos, como mostra a figura 41.

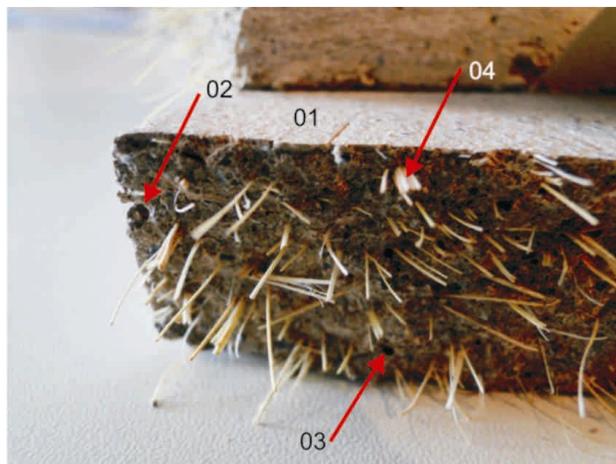


Figura 41 Seção transversal do corpo de prova do compósito sisal 15 mm apresenta boa distribuição do material reforço em toda a seção, porém com alguns vazios ocasionados por bolhas de ar, descritas pela seta 02 e 03. (01 Superfície de compressão; 02. Ponto de fragilidade; 03. Bolha de ar; 04.Nó de fibra)



Figura 42 Seção transversal do corpo de prova do compósito sisal 15 mm apresenta boa distribuição do material reforço em toda a seção

4.2.2 Corpo de prova reforçado com fibra de malva 15 mm

Assim como nos corpos de prova de SISAL15 mm, o corpo de prova da MALVA15 mm seguiu o mesmo processo de fabricação, moldagem e ensaio. Neste estudo foram ensaiados 08 CPs, conforme ilustrado na figura 43.

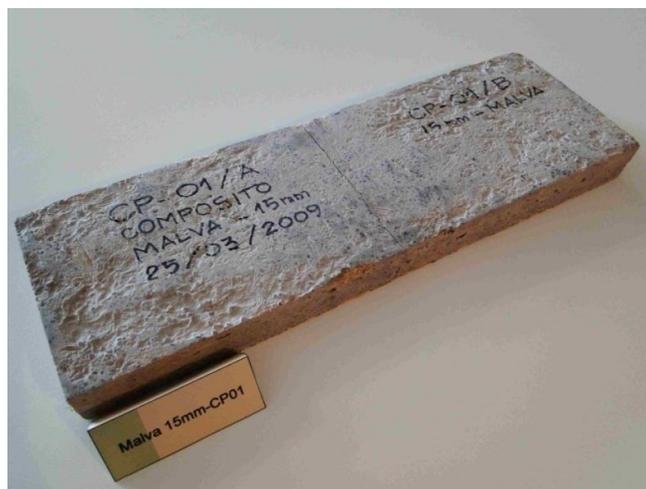


Figura 43 CP reforçado com fibra de malva 15 mm – MALVA15

Mais uma vez, foi determinantemente o papel das fibras no desempenho do compósito, sob ensaio de flexão. (após o aparecimento da primeira fissura). A resistência a flexão atingida pela MALVA15, não excedeu o pico de 5,01 MPa. Esses números indicam que o compósito apresentou um comportamento mecânico à flexão 33,39% menor que o material base (matriz plena). Este enfraquecimento do material ocorre com a adição das fibras na argamassa, o que aumenta o número de vazios e pontos críticos (frágeis), proporcionando a fratura do material matriz antes de atingir o pico da matriz plena. Na tabela 10 têm-se os resultados das propriedades mecânicas da matriz plena e reforçada com fibra de malva de 15 mm de comprimento e fibras de sisal de 15 mm de comprimento.

Tabela 10. Resultados comparativos: Matriz plena x Malva15mm x Sisal15mm

Tipo de Amostra	Força Máxima	Resistência	
	Média (N) (desv. padrão)	Máxima em flexão (MPa)	Módulo (MPa)
Matriz Plena	1278 (±53,53)	7,66 (±0,32)	11030(±753)
Malva 15mm	835,4 (±75,65)	5,01 (±0,45)	8184 (±770,4)
Sisal 15mm	886,1(±107,5)	5,31 (±0,64)	7990 (±336,9)

Porém os mesmos números descrevem uma pequena melhora na tenacidade e uma pseudo ductilidade, observados na resistência a flexão e no módulo de elasticidade em relação ao SISAL15 descrito na tabela 7.

Os resultados dos comportamentos do SISAL15 e da MALVA15 estão bem próximos. No entanto, com leve melhora na tenacidade, na resistência à flexão, na carga aplicada e no módulo de elasticidade para o compósito MALVA15.

A tenacidade é uma importante característica para os materiais compósitos constituídos de fibras vegetais, sendo geralmente aceito que um dos principais papéis desempenhados pelas fibras é promover a tenacidade às matrizes frágeis. (TOLÊDO FILHO et. al, 2002).

Os dois CPs obtiveram melhora no seu comportamento, porém a carga máxima da MALVA15 atingiu, apenas, 65,37% da carga atingida pela MATRIZ PLENA. E em relação ao SISAL15 a carga máxima atingida pela MALVA 15 foi de 94,28% da carga do SISAL 15. Isto é o SISAL 15 obteve um desempenho superior na carga máxima na ordem de 5,72% em relação a MALVA 15.

Quando analisados os comportamentos dos CPs com fibras diferentes, porém com mesmo tamanho. Observa-se que tanto o SISAL15 quanto o MALVA15 não apresentaram melhorias na pré-fissuração. Isto se deve ao fato que as fibras de baixo módulo não alteram o comportamento do material antes da ruptura. Segundo Agopyan(1993) as fibras de baixo módulo não alteram as propriedades da matriz antes da ruptura, porém após isso, as fibras, se estiverem em quantidades suficientes, poderão suportar as cargas aplicadas, conferindo ao compósito propriedades dúcteis. Como descreve a figura 44.

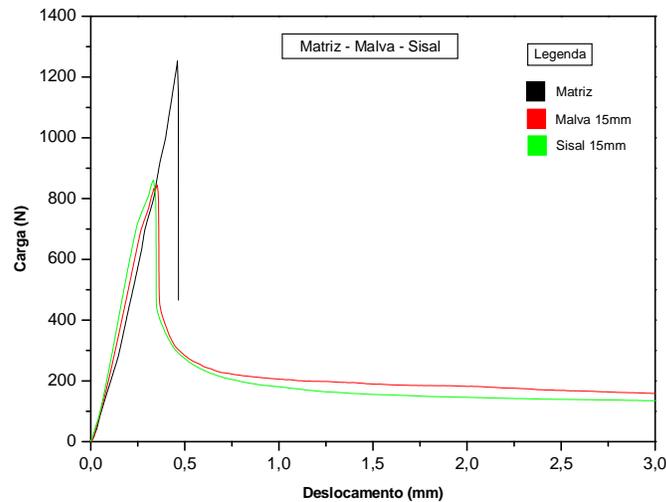


Figura 44 Comparativo das curvas carga versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos de matriz plena e compósito reforçado com fibra de sisal 15 mm e malva 15 mm.

4.2.2.1 Análises macro e microestrutural

O corpo de prova de malva 15mm apresentou uma falta de homogeneidade dos materiais constituintes. O aparecimento de nós de fibra concentrados próximo as arestas geraram um ponto frágil, favorecendo o aparecimento da primeira fissura. As fibras, neste caso, enfraqueceram o material por falta de uma boa dispersão na matriz, conforme pode ser observado nas figuras 45, 46, e 47. Essas figuras apresentam a microscopia da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de malva 15 mm e apresenta bolhas de ar na superfície e nós e pontes de fibras gerando possível início de fissuração do CP.

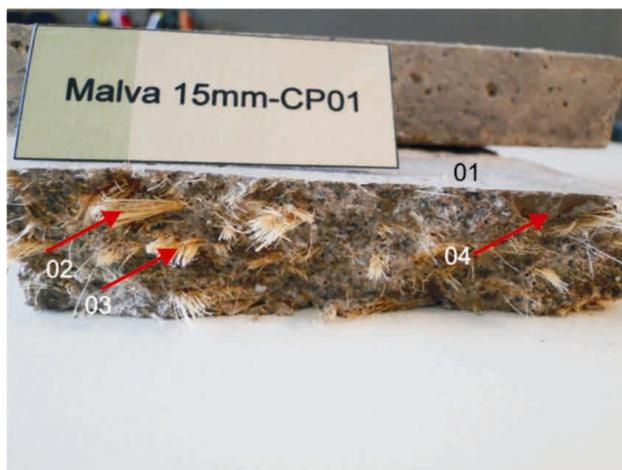


Figura 45 Secção transversal do corpo de prova do composto malva 15 mm não apresentou boa homogeneidade do material reforço em toda a secção, apresentou nós de fibras descritos pelas setas 02 e 03 e alguns vazios com ausência de fibra descrita pela seta 04. (0 Superfície de Compressão; 02 e 03 Nó de fibras; 04. Ausência de fibra)

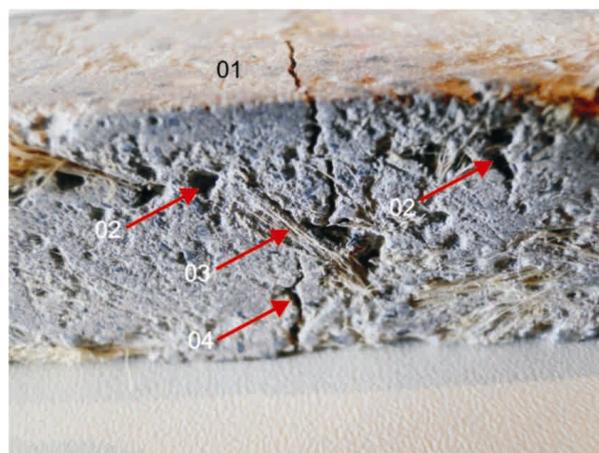


Figura 46 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do composto de matriz frágil reforçada com fibra de malva 15 mm apresenta bolhas de ar na superfície descrita pela seta 02 e nós e pontes de fibras descritas pela seta 03 gerando possível início de fissuração do CP. (01. Superfície de Compressão; 02. Bolha de ar ; 03 Ponte de fibra; 04. Fissura)

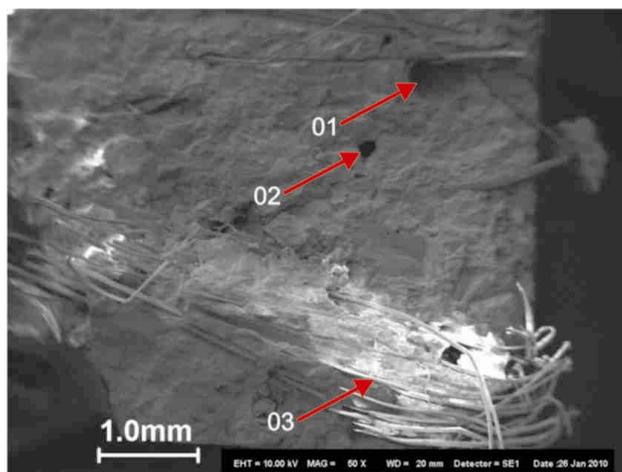


Figura 47 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de malva de 15 mm apresenta bolhas de ar que geram ponto de fragilidade, nós de fibras e arrancamento da fibra, descritos pelas setas 01,02 e 03, respectivamente. (01 Bolha de ar; 02. Arrancamento da fibra ; 03 Nó de fibras)

4.2.3 Corpo de prova reforçado com fibra de sisal 25 mm

Os CPS foram fabricados com dimensões 300 x 100 x 25 mm para ensaio de flexão em 3 pontos com adição de 1% do peso da mistura (cimento, areia e água), e fibras de sisal 25 mm alcançando um total de 21g de reforço. A figura 48 ilustra um corpo de prova do material compósito antes do ensaio.



Figura 48 CP reforçado com fibra de SISAL25 mm antes do ensaio

Na adição de fibras com comprimento de 25 mm observou-se um ganho no comportamento mecânico do compósito, pós-ruptura da matriz em relação aos compósitos de sisal e malva com fibras de 15 mm.

Obeve-se um ganho nas propriedades do compósito observada na força máxima, resistência a esse ganho está na força máxima e no módulo de elasticidade como mostra a tabela 11. Fibras com módulo baixo comportam-se como reforço idealmente extensíveis (GRAY & OHASHI, 1983; SPECHT, 2000).

Tabela 11. Resultados comparativos: SISAL25 x SISAL15 x MALVA15

Tipo de Amostra	Força Máxima Média (N) (desv.padrão)	Resistência Máxima em flexão (MPa)	Módulo (MPa)
Sisal 15mm	886,1(±107,5)	5,31 (±0,64)	7990(±336,9)
Malva 15mm	835,4 (±75,65)	5,01 (±0,45)	8184 (±770,4)
Sisal 25mm	1006 (±91,04)	6,03 (±0,54)	8633 (±832,3)

Observou-se, também, que com o aumento do comprimento da fibra de 15 mm para 25 mm, o compósito apresentou melhoria substancial em relação aos ensaios dos CPs de sisal e malva com fibras de 15 mm. O aumento do comprimento da fibra provoca redução do índice de fragilidade e aumento da capacidade de absorção de energia (CROCKFORD et al, 1993; ULBRICH, 1997; MONTARDO et al, 2001).

O comportamento do SISAL25 apresentou neste ensaio uma força a ruptura inferior a MATRIZ PLENA na ordem de 21,28%, como esperado, porém com acréscimo, na mesma força, de 13,53 % sobre o SISAL15 onde atingiu um pico de 886,1 N, e uma melhora na ordem de 20,42% sobre a MALVA15. Com mesma força o aumento do comprimento provoca diminuição da resistência de pico e aumento da capacidade de absorção de energia (MAHER & HO, 1994).

Os resultados mostraram que a energia absorvida pelo SISAL25 cresceu em relação aos CPs avaliados anteriormente. O aumento dessa tenacidade e ductilidade já era previsto. Quanto maior o comprimento da fibra maior é ganho de resistência mecânica, até um limite assintótico (GRAY & OHASHI, 1983; ULBRCH, 1997; SANTONI et al, 2001; MONTARDO et al, 2001). A figura 49 ilustra esse comportamento.

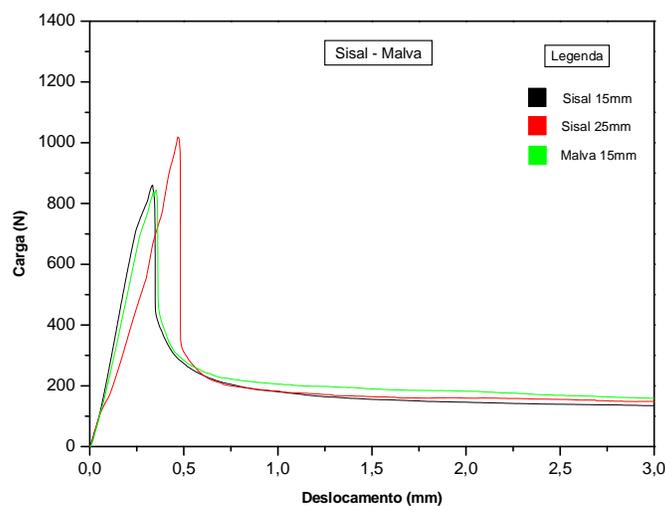


Figura 49 Comparativo das curvas carga versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de sisal 25 mm, sisal 15 mm e malva 15 mm.

4.2.3.1 Análises macro e microestrutural

As características, visíveis, do material demonstram que durante o processo de fabricação houve falha na mistura, ocasionando no material uma probabilidade de ruptura antecipada. A má distribuição dos materiais constituintes poderia ser evitada, porém o próprio material reforço propicia o “empelotamento” das fibras antes da inserção delas à argamassa. As figuras 50, 51, 52 e 53 mostram as características da falha.

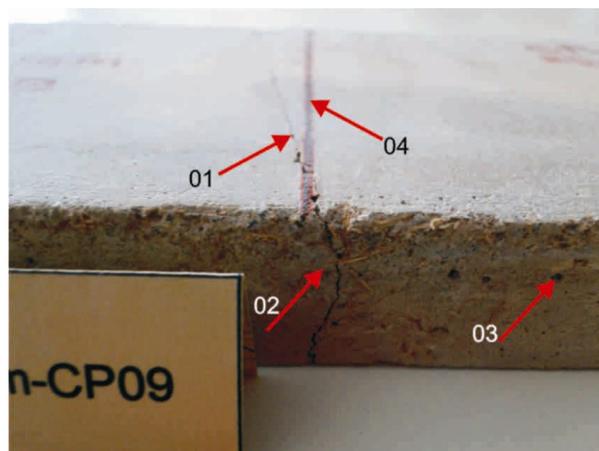


Figura 50 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de sisal 25 mm apresenta bolhas de ar na superfície descrita pela seta 03 e nós e pontes de fibras descritas pela seta 02 gerando possível início de fissuração do CP, descritas pela seta 01. (01. Fissura; 02. Ponte de fibra; 03. Bolha de ar; 4. Eixo do CP)



Figura 51 Secção transversal do corpo de prova do compósito sisal 25 mm apresentou boa distribuição das fibras do material reforço em toda a secção

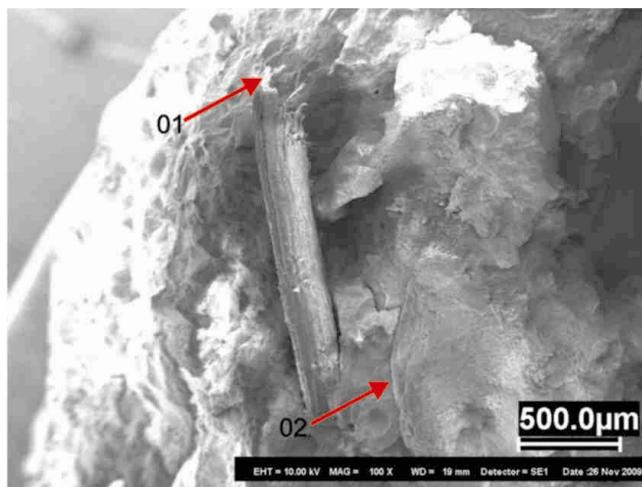


Figura 52 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal 25 mm apresenta fibra rompida pela transferência dos esforços matriz/reforço. (01. Rompimento da fibra; 02. Fissura)

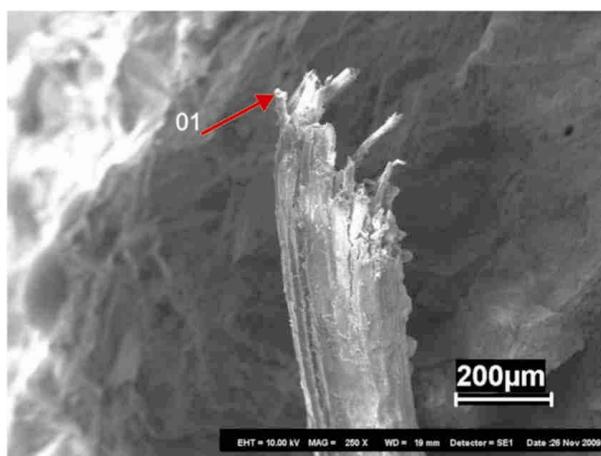


Figura 53 Análise microscópica da fibra rompida pelo esforço de tração ocasionado pela transferência dos esforços matriz/reforço. (01. Detalhe da fibra rompida pelo esforço de tração)

4.2.4 Corpo de prova reforçado com fibra de malva 25 mm

Nestes ensaios foram produzidos 09 corpos de prova com dimensões 300 x 100 x 25 mm com adição de 1 % (do peso da mistura cimento água e areia) de fibra de malva de 25 mm. A figura 54 ilustra o corpo de prova usado no ensaio de flexão em três pontos.



Figura 54 CP reforçado com fibra de malva 25 mm – MALVA25 usado no ensaio de flexão em três pontos

O desempenho mecânico da MALVA25 apresenta uma resistência a flexão inferior a MATRIZ PLENA. A força máxima atingida para ruptura do CP foi de 1045 N e o módulo de elasticidade não ultrapassou a razão de 6,91 GPa. Como mostra a tabela 12.

Tabela 12. Resultados comparativos: MALVA25 x SISAL15 x MALVA15 x SISAL25

Tipo de Amostra	Força Máxima Média (N) (desv. padrão)	Resistência Máxima em flexão (MPa)	Módulo (MPa)
Sisal 15mm	886,1 ($\pm 107,5$)	5,31 ($\pm 0,64$)	7990 ($\pm 336,9$)
Sisal 25mm	1006 ($\pm 91,04$)	6,03 ($\pm 0,54$)	8633 ($\pm 832,3$)
Malva 15mm	835,4 ($\pm 75,65$)	5,01 ($\pm 0,45$)	8184 ($\pm 770,4$)
Malva 25mm	1045 ($\pm 83,58$)	6,27 ($\pm 0,5$)	6915 ($\pm 588,2$)

A carga máxima do MALVA25 apresentou uma perda de 18,23% em relação a MATRIZ PLENA, porém seu comportamento foi majorado em 17,93% quando comparado ao SISAL15. Observou-se, também, um ganho menor porém significativo (com a adição das fibras de maior comprimento) de 25,09% quando comparado a MALVA15. Estes resultados demonstram que o comprimento de fibra interferiu no resultado positivo na relação da MALVA25 com a MALVA15 e com SISAL15. Na comparação direta entre os CPs de fibras diferentes, porém de mesmo comprimento, a fibra de malva demonstrou superioridade no comportamento pós fissura. Isto é, a o

compósito com fibra de malva absorveu mais energia que o compósito com fibra de sisal. Esse resultado pode estar ligado ao tipo de micro estrutura que a fibra possui.

Em seu estudo Savastano Júnior e Pimentel (2000), descreveram que “o compósito reforçado com fibra de malva também apresentou absorção de energia elevada, quase 5 vezes maior que o padrão. Neste caso particular, é possível que o aspecto fibrilado da fibra tenha colaborado para a maior superfície de contato fibra-matriz aumentando assim a dissipação de energia” esse comportamento pode ser observado no gráfico da figura 55.

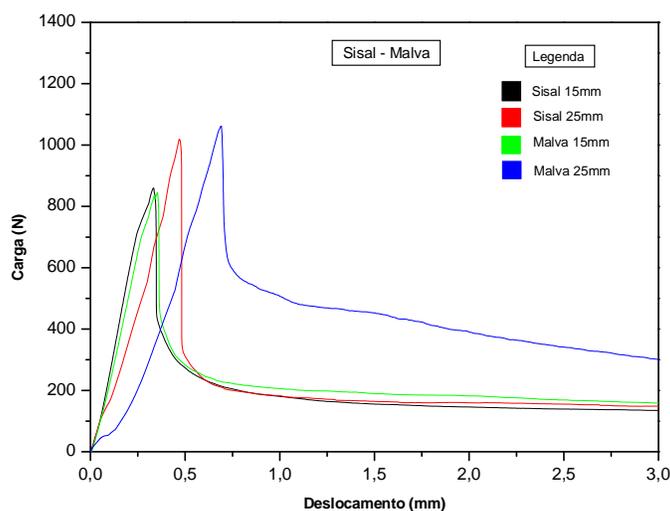


Figura 55 Comparativo das curvas carga versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de malva 25 mm, sisal 25 mm, sisal 15 mm e malva 15 mm

4.2.4.1 Análises macro e microestrutural

Nas características macro e micro estruturais observou-se que mesmo com uma homogeneidade regularmente satisfatória, a MALVA25 obteve bons resultados. O aparecimento de nós e vazios de fibra próximos as arestas foram determinantes para o resultado inferior a MATRIZ PLENA. A fibra de malva 25mm mesmo sendo inserida manualmente na argamassa, apresentou uma dificuldade de homogeneização com o material matriz. As figuras 56, 57, 58 e 59 demonstram essas deficiências do corpo de prova de fibra de malva 25. Essas figuras ilustram a microscopia da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada

com fibra de malva 25 mm apresenta pontos de fragilidade gerados pelos nós de fibras que descreve a possível origem da fissura no ponto de fragilidade.

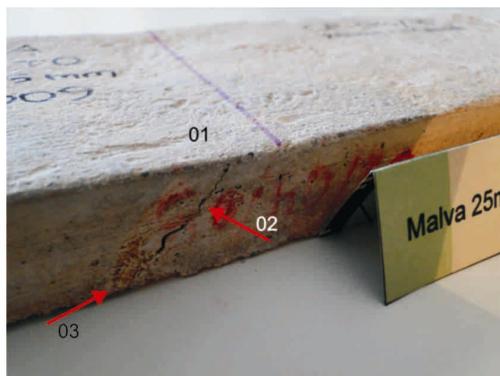


Figura 56 A análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de malva 25 mm apresenta pontos de fragilidade gerados pelos nós de fibras, posicionados na aresta submetida o esforço de tração descrito pela seta 03. A seta 02 descreve a possível origem da fissura no ponto de fragilidade atravessando sua secção longitudinal em aproximadamente 45°. (01. Superfície de compressão; 02. Fissura a 45°; 03. Origem da fissura no ponto de fragilidade)

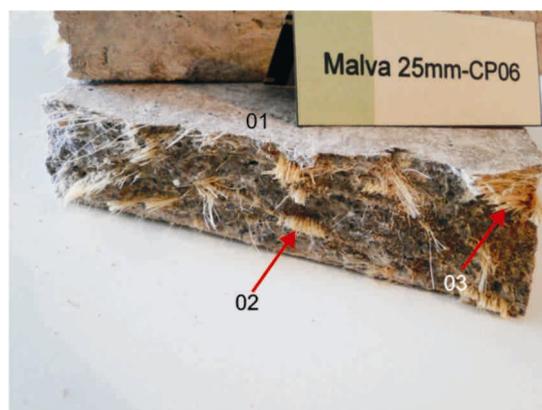


Figura 57 Secção transversal do corpo de prova do compósito malva 25 mm não apresentou boa homogeneidade do material reforço em toda a secção, apresentou nós de fibras descritos pelas setas 02 e 03. (01. Superfície de tração; 02. Nó da fibra; 03. Ponto de fragilidade – início de fissuração)

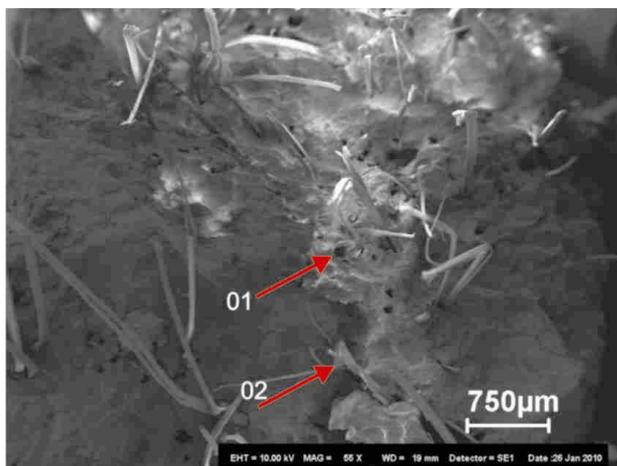


Figura 58 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de malva 25 mm apresentou alguns arracamentos (pull-out) descritos pela seta 01 e boa trabalhabilidade das fibras sofrida pela transferência de esforços matriz/reforço, o que ocasionou seu rompimento descrita pela seta 02. (01. Arrancamento; 02. Rompimento da fibra)

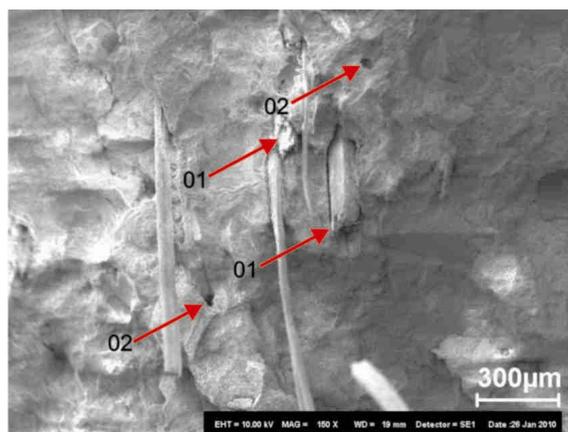


Figura 59 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de malva 25 mm apresentou alguns arracamentos (pull-out) descritos pela seta 02 e boa trabalhabilidade das fibras sofrida pela transferência de esforços matriz/reforço, o que ocasionou seu rompimento descrito pela seta 01. (01.Rompimento da fibra; 02.Arrancamento)

4.2.5 Corpo de prova híbrido 15mm

Foram fabricados, para ensaio de flexão em três pontos, 09 corpos de prova com mesma geometria e dimensão dos anteriores.

O diferencial está no tipo de reforço (fibras) que agora, são um "composé" de malva e sisal que vão dar origem a um material híbrido. Usando proporções iguais para ambas as fibras de 0,5% (em peso da mistura cimento, areia e água) chegando, na somatória, um total de 21g o que equivale a 1% do peso da mistura que é de 2,1kg (matriz plena). A figura 61 ilustra o corpo de prova que foi usado no ensaio de flexão em três pontos para esta série de amostras.



Figura 60 Corpo de prova HÍBRIDO15 mm

Os resultados mostraram o HÍBRIDO15 apresentou um comportamento médio comparado aos compósitos SISAL 15 e MALVA 15. Quando comparado os resultados de Força máxima, o HÍBRIDO15 apresentou um desempenho 2,86% inferior ao SISAL15 e 3,04% superior a MALVA15. Os módulos de elasticidade e a resistência a flexão apresentaram os seguintes percentuais: Na resistência a flexão houve uma queda em relação ao SISAL15 na ordem de 2,86% e um desempenho superior em relação a MALVA15 de um percentual de 3,05%. O módulo de elasticidade do HÍBRIDO15 apresentou um comportamento mecanicamente inferior em relação ao SISAL15, apresentando uma perda na ordem de 7,26%, atingido um pico de 7,41 GPa. E em relação a MALVA15 um percentual maior na ordem de 9,57%. Esses resultados estão descritos na tabela 12.

Tabela 13. Resultados comparativos: SISAL15 x MALVA15 x HÍBRIDO15

Tipo de Amostra	Força Máxima		Resistência	
	Média (N) (desv. padrão)	Máxima em flexão (MPa)	Módulo (MPa)	
Sisal 15mm	886,1 ($\pm 107,5$)	5,31 ($\pm 0,64$)	7990 ($\pm 336,9$)	
Malva 15mm	835,4 ($\pm 75,65$)	5,01 ($\pm 0,45$)	8184 ($\pm 770,4$)	
Híbrido 15mm	860,8 ($\pm 58,88$)	5,16 ($\pm 0,35$)	7401 ($\pm 559,5$)	

A deformação do material HÍBRIDO15 antes da primeira fissura, foi superior a MALVA15 e inferior (porém muito próximo) do SISAL15 o que pode ser considerado um resultado positivo.

Seu desempenho, após a primeira a fissura, descreveu uma melhora nos resultados comparados aos compósitos SISAL15 e MALVA15. Esses resultados positivos refletiram na tenacidade e na pseudo ductilidade do compósito Híbrido. O gráfico da figura 62 ilustra essas performances alcançadas com o HÍBRIDO15.

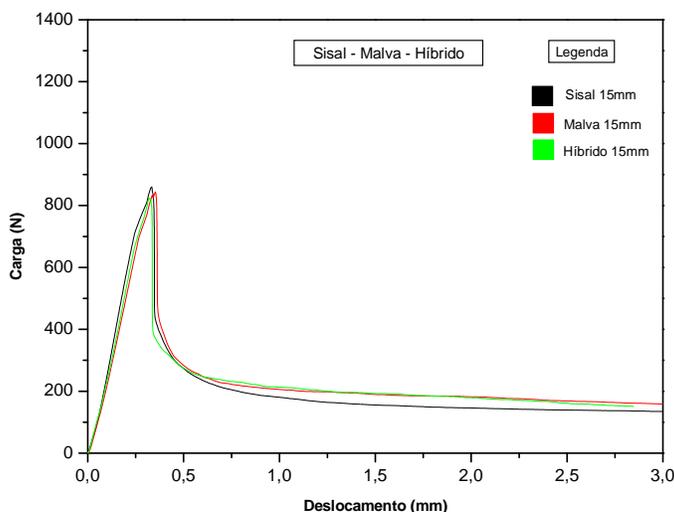


Figura 61 Comparativo das curvas carga versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de sisal 15 mm, malva 15 mm e híbrido 15 mm

4.2.5.1 Análises macro e microestrutural

Esses resultados podem ser avaliados pela boa homogeneidade dos materiais constituintes (o que ocorre com mais frequência, em compósitos de fibras curtas) e uma boa trabalhabilidade do material de reforço. O pouco aparecimento de bolhas de ar e de nós no interior do CP, formados pelas fibras (o que se observa muito na MALVA15) foi um adendo positivo na avaliação do material. Este híbrido desempenhou um papel positivo nas análises comparativas. As figuras 62, 63 e 64 mostram sua macro e microestruturas, indícios de algumas fissuras que se desenharam perpendicular ao sentido longitudinal do CP.



Figura 62 Seção transversal do corpo de prova do compósito híbrido 15 mm apresentou boa dispersão do material reforço em toda a seção

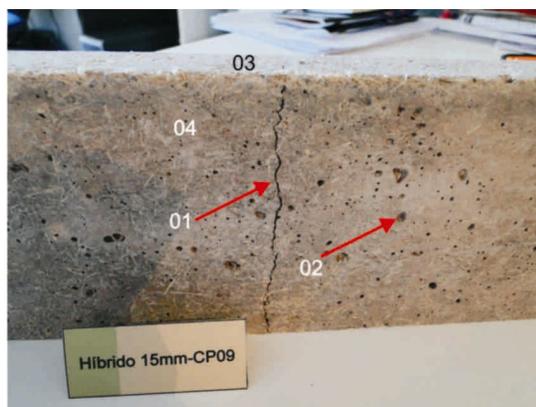


Figura 63 Análise macroscópica da superfície do corpo de prova do compósito de matriz frágil reforçada com fibra de sisal de malva 15mm apresenta pontos de fragilidade gerados por bolhas de ar em sua superfície que sofreu o esforço de tração, descrita pela seta 02. A seta 01 descreve fissuração perpendicular a seção longitudinal do corpo de prova. (01. Fissura perpendicular a seção transversal; 02. Bolhas; 03. Espessura; 04. Superfície de tração)

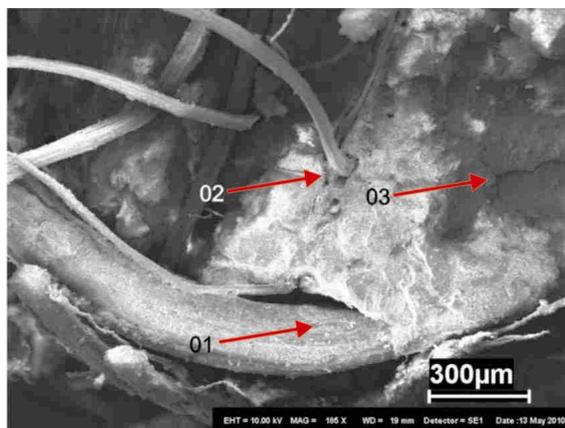


Figura 64 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal e malva 15 mm apresentou uma boa distribuição do material reforço. Próximo a zona de transição ou interface detectou-se o surgimento de micro fissuras descritas pela seta 03. (01. Fibra de sisal; 02. Fibra de malva; 03. Micro fissuras)

As fibras de sisal e malva, obtiveram uma boa “performance” neste híbrido. A boa dispersão do material reforço contribuiu com o resultado positivo.

Bauer (1987) em sua pesquisa, considera alguns fatores que influenciam na distribuição das fibras, dentre elas: a) o teor de fibras b) sua geometria c) aspectos d) forma do agregado e e) procedimento de mistura.

4.2.6 Corpo de prova híbrido 25mm

Este último CP, confeccionado para ensaio de flexão em três pontos, possui as dimensões 300 x 100 x 25 mm, as mesmas usadas em todo o estudo. Adição de 1% do peso da mistura (cimento areia e água) em fibra de sisal e malva (obedecendo a mesma proporção de 0,5% para cada) e cortado em tamanho padrão de 25mm. A figura 66 ilustra um corpo de prova desta série que foi usado no ensaio de flexão em três pontos.

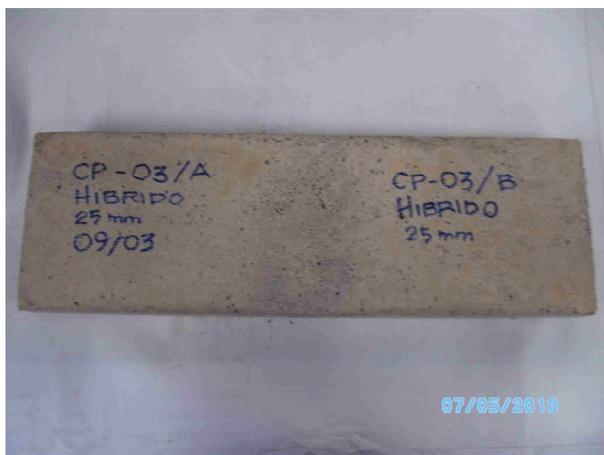


Figura 65 CP reforçado com híbrido de fibras sisal/malva 25mm – híbrido25

O corpo de prova Híbrido 25 apresentou dados inferiores em relação ao compósito Sisal 25 e Malva 25.

O material Híbrido 25 obteve um comportamento satisfatório quando observada sua tenacidade e pseudo ductilidade, e uma perda na resistência a flexão expressa em números como mostra a tabela 13.

Onde antes houve um maior número de arrancamento (pouca aderência ou comprimento insuficiente para ancoragem quando comparados os CPs de fibras curtas 15mm) neste material percebe-se mais trabalhabilidade do reforço, o que reflete na maior absorção de energia ou um aumento na tenacidade do material compósito.

Os resultados de força máxima e resistência a flexão foram inferiores em comparação aos SISAL25 e MALVA25. No entanto o módulo de elasticidade obteve melhoramento em relação aos CPs como mostra a tabela 13.

Quando observado o comportamento do HÍBRIDO25 em relação ao SISAL25 (individualmente) observa-se que houve um decréscimo nos valores da força máxima na razão de 6,95%. E em relação MALVA25 na ordem de 10,42% algo substancial para um compósito com fibras de baixo módulo.

Quando o HÍBRIDO25 é comparado ao SISAL25 na resistência a flexão, a perda está na ordem de 6,96%. Quando comparados a MALVA 25 em relação a mesma propriedade a perda é de 10,46 como mostra a tabela 13.

Em ambas as situações, percebe-se que as fibras mais longas interferiram na homogeneidade e na densidade do material, gerando um aumento dos pontos críticos e de pontos de enfraquecimento nos Corpos de Prova.

No entanto, essas mesmas fibras, que contribuíram para o decréscimo da força máxima e da resistência a flexão no material, indicaram uma performance positiva e satisfatória em relação aos compósitos SISAL25 e MALVA25.

Esses resultados refletem, também, uma superioridade no comportamento do compósito quando feito as comparações entre o comprimento das fibras.

Quando comparado HÍBRIDO25 com SISAL15 os módulos de elasticidade se diferem entre si em 12,79% de superioridade nesse comportamento atingido pelo HÍBRIDO25. Se fazendo o mesmo comparativo entre o HÍBRIDO25 e MALVA15, os resultados são menores, mas ainda satisfatório, onde o compósito obteve um ganho na ordem de 10,12% descrito no gráfico da figura 66.

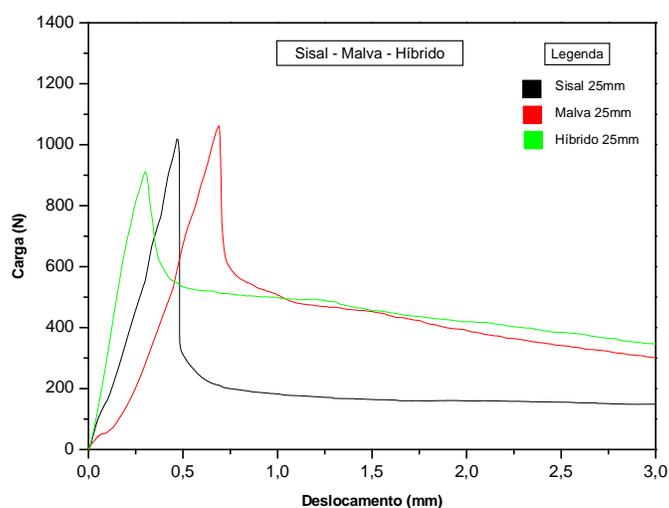


Figura 66 Comparativo das curvas carga versus deslocamento dos corpos de prova dos compósitos reforçados com fibras de sisal 25 mm, malva 25 mm e híbrido 25 mm

Tabela 14. Resultados comparativos: SISAL25 x MALVA25 x HIBRIDO25

Tipo de Amostra	Força Máxima	Resistência	
	Média (N) (desv. padrão)	Máxima em flexão (MPa)	Módulo (MPa)
Sisal 25mm	1006 ($\pm 91,04$)	6,03 ($\pm 0,54$)	8633 ($\pm 832,3$)
Malva 25mm	1045 ($\pm 83,58$)	6,27 ($\pm 0,50$)	6915 ($\pm 588,2$)
Híbrido 25 mm	936,1 ($\pm 53,24$)	5,61 ($\pm 0,31$)	9012 ($\pm 868,5$)

4.2.6.1 Análise macro e microestrutural

Nas análises macro e microestrutural do compósito HIBRIFO25, o cp médio apontou resultados que corresponderam aos ensaios. Uma perda na resistência a tensão e na carga aplicada. Esse resultado pode ter sido influenciado pela falta de homogeneidade do CP e conseqüentemente uma má distribuição do material reforço (fibras) o que gerou o aparecimento de nós de fibras ocasionando o enfraquecimento do material, conforme podemos observar nas figuras 67 e 68.



Figura 67 Secção transversal do corpo de prova do compósito híbrido 25 mm apresentou boa distribuição do material reforço em toda a secção descrita pela seta 02. (01. Superfície de compressão; 02. Homogeneidade)

;

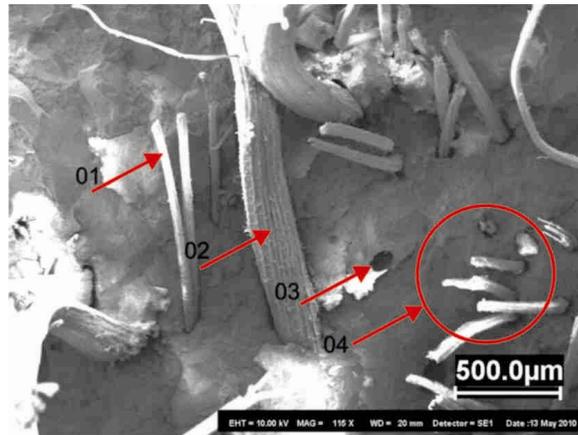


Figura 68 Análise microscópica da superfície da fratura da matriz plena reforçada com fibra de sisal e malva 25 mm apresentou uma boa distribuição do material reforço. Na superfície apresentada observou-se alguns arrancamentos (pull-out) descritos pela seta 03 e boa trabalhabilidade das fibras sofrida pela transferência de esforços matriz/reforço, o que ocasionou seu rompimento descrito pela seta 04. (01.Fibra de malva; 02. Fibra de sisal; 03. Arrancamento; 04. Rompimento das fibras por tração)

5 CONCLUSÃO

O procedimento para fabricação dos corpos de prova utilizado neste estudo mostrou ser eficiente principalmente no que diz respeito à pesagem e armazenamento dos constituintes separadamente. O processo de corte das fibras mostrou-se prático e rápido.

Na confecção dos moldes, melhorias podem ser efetuadas. A impermeabilização do molde de madeira revestindo-o com fórmica, melhoraria o processo de desmoldagem e aumentaria a precisão da geometria dos CPs.

O processo de homogeneização manual dos constituintes mostrou-se uma alternativa viável no entretanto pouco produtiva se considerada uma produção em larga escala. Em outros estudos o método de homogeneização mecânica mostrou-se viável em manter o material íntegro e os resultados positivos.

O compósito de malva apresentou o melhor desempenho na deformação, antes do aparecimento da primeira fissura, quando reforçado com fibras de 25 mm.

O compósito de fibra de sisal apresentou bons resultados com as fibras mais longas (25mm), porém inferiores ao compósito de malva com fibras de mesmo comprimento.

Nos compósitos híbridos os resultados foram positivos. O material mostrou bons resultados com acréscimo da força máxima e da resistência a flexão nas fibras mais curtas (15 mm) em relação ao compósito de malva de mesmo comprimento de fibra. Com melhor absorção de energia nos compósitos híbridos com fibras longas (25 mm).

Os estudos fractográficos, comprovaram alguns dos mecanismos de falha do material compósito, principalmente na constatação do excesso de arrancamento nos compósitos de 15 mm, o aparecimento de cristais e micro fissuras próximo de bolhas de ar.

As propriedades mecânicas na flexão mostraram resultados positivos referente a absorção da energia do material compósito indicando como melhor desempenho na absorção de energia, o melhor desempenho na resistência a flexão e à força máxima, o Compósito MALVA25.

REFERÊNCIAS

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

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H. ; DANTAS, F. A. S. **Fibras - Zona de Transição**. Técnica. Revista de Tecnologia da Construção, São Paulo, n. 7, p. 24-27, 1993.

BAUER, L. A. FALCÃO; NORANHA, M. A. **Concreto armado com fibras**. Boletim técnico Bauer nº 07. São Paulo, 1987.

BEBER, A. J. **Reforço de estrutura de concreto com compósito de fibra de carbono**. Porto Alegre: PPGEC / UFRGS, 1999. 37 p. Caderno Técnico.

BISANDRA, E. T. N.; ANSELL, M. P. **Composites Sci. Technol.** 41, p.165 1991.

CALLISTER, W.D.JR. **Materials Science and Engineering: na introduction**. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. 852 p.

CALLISTER, W.D.JR. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução**. Utah. LTC, 2002. 602p.

COOK, D. J. **Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres, Concrete**. Internacional, Ci80, Fibrous Concrete. The Concrete Society. UK: the construction Press, p. 99-114, 1980.

CROCKFORD, W.W.; GROGAN, W.P.; CHILL, D.S. **Strength and life of stabilied pavement layers conaining fibrillated polypropylene**. Washington: Transportation Research Record, D.C. n. 1418, p. 60-66, 1993.

DANIEL, I. M., ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York, USA: Oxford University Press, 1994.

FAGURY, R. V. G.. **Avaliação de Fibras Naturais para a Fabricação de Compósitos: Açaí, Coco e Juta**, 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

FAO, **Research and development programme on coconuts and their products**. Roma: FAO, 1991.

FATANI, M.N.; BAUER, G.E.; AL-JOULANI,N. **Reinforcing soil with aligned and randomly oriented metallic**. Philadelphia: Geotechnical Testing Journal, v.14, n.1, p. 78-87, 1991.

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, 1997.

GHAVAMI, K.; Toledo Filho, R.D.; Barbosa, N.P. **Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres**. England: Cement and Concrete Composites, v.21, p.39-48, 1999.

GRAY, D.H.; AL-REFEAI, T. **Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand**. New York: Journal of Geotechnical Engineering, v.112, n.8, p. 804-820, 1986.

GUIMARÃES, S. da s. **Uyilização de fibras vegetais como reforço para argamassa de cimento**. In: Seminário Latino-Americano sobre Construccion de Vivendas econômicas, 2. Monterrey, Oct. 4-6, s.n.t. pp. 181-206, 1982.

GRAM, H. E. **Durability of Natutural Fibers in concrete**, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1:83, 225 pp, 1983.

GRAY, D.H.; AL-REFEAI, T. **Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand**. New York : Journal of Geotechnical Engineering, v.112, n.8, p. 804-820, 1986.

GRAY, D. H. MAHER, M. H. **Admixture stabilization of sands qith random fibers**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro, Proceedings. Rotterdam: A.A. Balkema, 1989, v.2, p. 1363-1366.

GRAY, D.H.; OHASHI, H. **Mechanics of fiber reinforcement in sand**. New York: Journal of Geotechnical Engineering, v. 109, n.3, p. 335-353, 1983.

HANNANT, D. J. **Fibre cements and fibre concret**. New York, USA: John Wiley and Sons, 1978.

HEINECK, K.S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais**. 2002. 251p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 2002.

KANIRAJ, S.R.; HAVANAGI, V.G. **Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced fly ash-soil mixtures**. New York: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.127, n.7, p.547-584, 2001.

KLOSS, J.. at al. **Relationships between mechanical properties and structural paramenters of polyurethanes containing**. Polímero: Ciência e Tecnologia, 15, Nº1. p. 1-4,2005.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; VELASCO, R. V. Comportamento em tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – CBC2005. 08, 2005. **Anais...** v. VIII, p.212-230.

- LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; NAGAHAMA, K. J. **Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande - SP, vol. 11, n. 6, 2007.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Behavior of fiber-reinforced cemented sand under static and cyclic loads.** Philadelphia: Geotechnical Testing Journal, v. 16, n.3, p. 330-338, 1993.
- MAHER, M.H.; HO, Y.C. **Mechanical properties of Kaolinite/fiber soil composite.** New York: Journal of Geotechnical Engineering, v. 120, n.8, p. 1381-1393, 1994.
- MANO, E.B. **Polímeros como materiais de engenharia.** 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2000.
- MARCON, M. V. et al. **Pectins from Apple Pomace.** Plímeros: Ciência e Tecnologia, 15 n. 2, p. 127-129, 2005.
- MATTOSO, L.H.C. et AL. **Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos.** EMBRAPA, n.3, p 1-4, nov., 1996.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; AL-HASANI, M.M. **Efect of inclusion properties on the behavior of sand.** London: Géotechnique, v. 128, n.3, p.327-346, 1978.
- MCGOWN, A.; ANDRAWES, K.Z.; HYTIRIS, N. MERCER, F.B. **Soil strengthening using randomly distributed mesh elements.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 11., São Francisco, 1985, Proceedings. 1985. v.3, p. 1735-1738.
- MEDINA, J.C. **O sisal.** São Paulo, Secretaria da Agricultura, 1954. 286p.
- METHA, P.K. MOTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: Pini, 1994.
- MONTARDO, J.P. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** 1999. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1999.
- MONTARDO, J.P.; CONSOLI, N.C.; PRIETTO, P.D.M. **Comportamento mecânico de compósitos solo-cimento-fibra: estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes.** Solos e Rochas, São Paulo, ABMS/ABGE, v.24, n.3, p. 191-209, 2001.
- MORASSI, O. J. Fibras Naturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DE MATERIAIS CBCIMAT. 12, 1994. **Anais...** p. 1259-1262.
- MOREL, J.C.; GOURC, J.P. **Mechanical behavior of sand reinforced with mesh elements.** Minnesota: Geosynthetics International, v. 4, n.5, p. 481-508, 1997.

MORRISON, J. K. SHAH, S. P. JENQ, Y. S. **Analysis of fiber debonding and pullout in composites**. New York: Journal of Engineering Mechanics, v. 114, n. 2, p. 277-94, 1988.

NEVES, O. N. E. **Elaboração de compósito biodegradável à base de pectina/Eva reforçado com fibra de coco**. 2006. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. Livro Técnico. [s.l.] : Pini, p. 61-341, 1982.

OLIVEIRA, M. J. AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras vegetais**. Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. EPUSP, 1993

PEREIRA, L. T. P.; BELÉIA, A. DEL P.. Isolamento, fracionamento e caracterização de paredes celulares de raízes de mandioca (*Manihot esculenta*, Crants). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. 24 n° 1, Campinas Jan./mar. 2004

PERUZZI, A. de P. **Comportamento das fibras de vidro convencionais em matriz de cimento portland modificada com látex e adição de sílica ativa**. 2002. Tese (Mestrado em Arquitetura)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Civil)- PUC, Rio de Janeiro 2005

RAS TECHNICAL BULLETIN. **Fibre concrete roofing (FCR) and micro concrete roofing (MCR)**. St Gallen: Basin, Jan. 1994. 4p. Issue n°. 3.

RILEM, **Testing methods for fibre reinforced cement-based composites**. *Materiaux et constructions*, v.17, n.102. 1984 (Rilem Draft Recommendations, technical committee 49 TFR)

RODRIGUES, J.S. **Comportamento de materiais compósitos de matriz poliéster reforçado por sistema híbrido fibras naturais e resíduos da indústria madeireira**. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

SANTONI, R.L.; TINGLE, J.S.; WEBSTER, S.L. **Engineering Properties of sand-fiber mixtures for Road construction**. New York: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 127, n. 3, p. 258-268, 2001.

SANTOS, N.S.S., **Estudo da Utilização de Trançados Vegetais na Elaboração de Compósitos laminados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

SARMIENTO, C. R. e 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. DANTAS, F. A. S. AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas.** São Paulo: IPT/Pini, 1994. 56p. (Publicação IPT 2156 – boletim 67)

SAVASTANO JR, H. AGOPYAN, V. OLIVEIRA, L. **Estudo da microestrutura das fibras vegetais e de suas implicações sobre o desempenho de compósitos cimentícios.** Jaboticabal, Engenharia Agrícola, v. 17, n. 1, p. 113-124. 1997

SAVASTANO JR, H. WARDEN, P.G. e COUTTS, R.S.P. **Brazilian waste fibres as reinforcement for cement-based composites.** *Cemente & Concrete Composites.* v. 22, p.379-384, 2000.

SAVASTANO JR, H. PIMENTEL, L. L. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, p.103-110, 2000.

SHEWBRIDGE, E.; SITAR, N. **Deformation-based model for reinforced sand.** New York: Journal of Geotechnical Engineering, v. 116, n.7, p.1153-1170, 1990.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, O. R. R. F. BELTRÃO, N. E. M. **O Agronegócio do sisal no Brasil.** Brasília: Embrapa-SPI, 1999.

SPECHT, L.P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidos a carregamentos estáticos visando à pavimentação.** 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 2000.

SEDAN D. A, PAGNOUX C. b, SMITH A. CHOTARD T. **-Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction-**Journal of the European Ceramic Society 28 (2008) 183–192

STANCATO, A. C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais a argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados.** 2006. 209 p. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UNICAMP, Campinas, 2006.

SWAMY, R. N. **FRC for sustainable infrastructure regeneration and rehabilitation. Fibre-Reinforced Concretes (FRC),** BEFB/RILEM. p.5-17, 2000.

SUAREZ, J. C. M.; COUTINHO, F. M. B.; SYDENSTRICKER, T. H.. **SEM studies of tensile fracture surfaces of polypropylene – sawdust composites.** Polymer testing. 22, 819 – 824.2003.

TAYLOR, G.G. **Materials in construction**. 2ed. London: Longman Scientific & Technical, 248p, 1994

TEODORO, J.M. **Resistência ao cisalhamento de solos reforçados com fibras plásticas**. São Paulo, 1999. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de São Carlos/ USP, São Paulo, 1999.

TOLEDO FILHO, R.D. **Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais: Caracterização Experimental**. 1997. 472p. Tese (Doutorado)- PUC, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R.D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G.L.; GHAVAMI, K. **Durability of alkalisensitive sisal and coconut fibers in cement mortar composites. Cement and Concrete Composites**. England: [s.n.], v.22, p.127-143, 2000.

TEZUCA, Y. **Concreto armado com fibras**. 2. ed. São Paulo: ABCP, 1989.

ULBRICH, L.A. **Apectos do comportamento mecânico de um solo reforçado com fibras**. 1997. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Porto Alegre, 1997.

YEW, G.H. et al. **Water absorption and enzymatic degradation of poly(lactic acid)/rice starch composites**. *Polymer Degradation and Stability*. 90,488-500, 2005

ZATTERA, A. J. et al. **Characterization of Ethylene – Vinyl Acetate Copolymer (EVA) Residues**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 15, Nº 1.73 – 78. 2005.