

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
MESTRADO

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE
COMPÓSITOS HÍBRIDOS DE FIBRAS DE
SISAL/FIBRAS DE VIDRO-ARGAMASSA DE
CIMENTO PORTLAND**

DISSERTAÇÃO

CAROLINA PEREIRA DANTAS

Campina Grande – Paraíba
AGOSTO- 2000

CAROLINA PEREIRA DANTAS

**Caracterização Experimental de Compósitos Híbridos
Fibras de Sisal/Fibras de Vidro – Argamassa de
Cimento Portland.**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de concentração: **Construções Rurais**
Orientadores: **ROMILDO DIAS TOLÊDO FILHO**
NORMANDO PERAZZO BARBOSA

Campina Grande – Paraíba
2000

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

D 192 C DANTAS, Carolina Pereira

Caracterização Experimental de Compósitos Híbridos
Fibras de Sisal/Fibras de Vidro – Argamassa de Cimento
Portland. / Carolina Pereira Dantas. Campina Grande –
UFPB, 2000 – 146 p: il.

Dissertação (Mestrado). UFPB/CCT
Inclui bibliografia

1.Fibras de sisal 2.Fibras de vidro 3.Compósitos híbridos
4.Resistência à compressão simples 5.Resistência à tração
indireta 6.Resistência à flexão 7.Comportamento pós-
fissuração

CDU: 691.15 – 037.1



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

COPEAG - PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

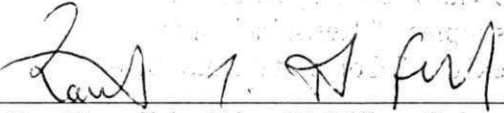
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

CAROLINA PEREIRA DANTAS

Título: "Caracterização experimental de compósitos híbridos de fibras de sisal/fibras de vidro-argamassa de cimento portland"

BANCA EXAMINADORA

PARECER


Prof. Dr. Romildo Dias T. Filho-Orientador

APROVADO


Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa-Orientador

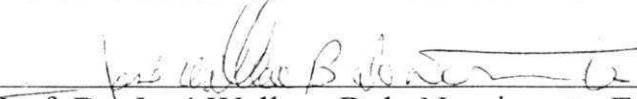
APROVADO


Dr. Aluisio Braz Melo-Examinador

APROVADA


Prof. Dr. Lucas Tadeu Barroso de Melo-Examinador

APROVADO


Prof. Dr. José Wallace B. do Nascimento-Examinador

APROVADO

AGOSTO - 2000

DEDICATÓRIA

A minha Filha, Maria, que nasceu atropelando a execução desse trabalho, mas, me trouxe uma alegria nunca sentida até então.

A todos que puderem fazer uso dos resultados desse trabalho, de forma prática ou para pesquisa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo.

A minha Mãe, Clívia, que, do seu lugar, me conforta e ilumina.

A meu Pai, Manelito, pela forma rica e eficaz, de me mostrar os verdadeiros caminhos da vida, e também de, junto com meus Irmãos; Dantas, Inês, Joaquim e Daniel; France, Marina e Carla, transmitir carinho, aconchego e segurança.

A meu Esposo, Audy, pela companhia, paciência e bem-querer, além da ajuda direta durante todo o trabalho.

Aos meus Orientadores, Professores Dr. Romildo Tolêdo e Dr. Normando Perazzo por me ajudarem de forma eficiente, na busca de novos conhecimentos, dedicando o tempo que muitas vezes não tinham.

Ao Professor Dr. Romildo Tolêdo, um agradecimento especial, por ter entendido os atropelos que passei, durante a execução desse trabalho.

À colega de trabalho, Maruska, pela amizade e grande ajuda na moldagem e ensaios dos corpos de prova.

Ao colega João Farias, pela prontidão em ajudar, sem medir esforços, transmitindo-nos, sempre, sua alegria interior.

Ao colega Padilha, que junto com João Farias, me auxiliaram nos ensaios dos corpos de prova.

A minha Tia Tuta, pelo aconchego da sua casa e pelo tempo dedicado a minha filha nos períodos em que precisei me ausentar.

A minha sogra, D. Susy, pelo incentivo, persistente, para que eu terminasse esse trabalho.

Ao meu tio Marcelo, por me ajudar a tornar mais fácil a comunicação com meu orientador, quando esse encontrava-se distante.

A todos os funcionários dos laboratórios de Solos I, Solos II, Solos III e LaCRA que contribuíram para execução dessa pesquisa.

Ao Prof. Dr. Jackson do DEM/UFPB Campus I, pelo apoio dado na utilização da Ploter x-y-t.

Ao Prof. Dr. Marcos Antônio dos Santos pelo seu apoio na utilização da MTS, na realização dos ensaios mecânicos.

A todos os amigos, parentes, ... , que de alguma forma, direta ou não, me incentivaram e ajudaram durante essa etapa da minha vida profissional.

Ao CNPq pela concessão da bolsa.

ÍNDICE

Lista de Tabelas	
Lista de Figuras	
Objetivos Gerais	
Objetivos Específicos	
Resumo	
Abstract	
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Fibras naturais vegetais.....	4
2.2 - Fibra de sisal.....	7
2.3 - Fibras de vidro.....	19
2.4 - Compósitos híbridos.....	20
Capítulo 3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 – Material	23
3.1.1 – Fibras de sisal.....	23
3.1.2 – Fibra de vidro.....	24
3.1.3 - Cimento portland.....	24
3.1.4 – Areia.....	25
3.1.5– Água.....	25
3.2 – Métodos.....	25
3.2.1 - Método de confecção dos corpos de prova.....	26
3.2.2 - Resistência mecânica do compósito.....	28
3.2.3 – Parâmetros utilizados para se avaliar o desempenho dos compósitos	31
Capítulo 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	33
4.1 – Resistência à compressão.....	33
4.2 – Resistência à tração.....	39
4.3 – Ensaio de flexão.....	43
4.3.1 – Influência do tipo e arranjo das fibras.....	43
4.3.2 – Compósitos híbridos.....	49
Capítulo 5 CONCLUSÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO I	95
ANEXO II	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1:	Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais.....	6
TABELA 2.2:	Produção mundial da fibra de sisal e principais países produtores.....	7
TABELA 2.3:	Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal.....	18
TABELA 2.4:	Composição química e morfologia das fibras de sisal.....	18
TABELA 2.5:	Composições típicas de vidros usados na produção de fibras.....	19
TABELA 2.6:	Propriedades da fibra de vidro.....	20
TABELA 3.1:	Composição química do cimento.....	24
TABELA 3.2:	Variáveis utilizadas no estudo.....	26
TABELA 4.1:	Análise de variância do ensaio de compressão dos compósitos híbridos formados com fibras curtas de sisal e de vidro.....	35
TABELA 4.2:	Resistência média à compressão da matriz e dos compósitos formados por fibra curta de sisal e fibra curta de vidro.....	38
TABELA 4.3:	Análise de variância do ensaio de compressão dos compósitos híbridos formados com fibras curtas de sisal e de vidro.....	41
TABELA 4.4:	Resistência média à tração indireta da matriz e dos compósitos formados por fibra curta de sisal e fibra curta de vidro.....	42
TABELA 4.5:	Índices de tenacidade do ensaio de flexão dos compósitos com fibras de sisal ou de vidro.....	47
TABELA 4.6:	Módulo de ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade dos compósitos híbridos de fibras curtas de sisal e de vidro	49
TABELA 4.7:	Análise de variância para carga de primeira fissura (FCLoad) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro.....	50
TABELA 4.8:	Valores teóricos e experimentais da carga de primeira fissura em flexão dos compósitos híbridos de fibras curtas de sisal e de vidro.....	52
TABELA 4.9:	Análise de variância para o módulo de ruptura (MOR) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro.	54
TABELA 4.10:	Valores teóricos e experimentais do módulo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro.....	55
TABELA 4.11:	Análise de variância para o T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro.	56

TABELA 4.12:	Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro.....	57
TABELA 4.13:	Módulo de ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade dos compósitos híbridos de fibras curtas de sisal e longas de vidro	60
TABELA 4.14:	Análise de variância para carga de primeira fissura (FCLoad) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	61
TABELA 4.15:	Valores teóricos e experimentais da carga de primeira fissura em flexão dos compósitos híbridos de fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	63
TABELA 4.16:	Análise de variância para o módulo de ruptura (MOR) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	64
TABELA 4.17:	Valores teóricos e experimentais do módulo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	65
TABELA 4.18:	Análise de variância para o T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	66
TABELA 4.19:	Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	67
TABELA 4.20:	Módulo de ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e curtas de vidro	69
TABELA 4.21:	Análise de variância para carga de primeira fissura (FCLoad) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	70
TABELA 4.22:	Valores teóricos e experimentais da carga de primeira fissura em flexão dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	72

TABELA 4.23:	Análise de variância para o módulo de ruptura (MOR) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	73
TABELA 4.24:	Valores teóricos e experimentais do módulo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	74
TABELA 4.25:	Análise de variância para o T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	75
TABELA 4.26:	Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	76
TABELA 4.27:	Módulo de ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e longas de vidro	80
TABELA 4.28:	Análise de variância para carga de primeira fissura (FCLoad) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	81
TABELA 4.29:	Valores teóricos e experimentais da carga de primeira fissura em flexão dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e longas de vidro.....	83
TABELA 4.30:	Análise de variância para o módulo de ruptura (MOR) do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	84
TABELA 4.31:	Valores teóricos e experimentais do módulo de ruptura dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	85
TABELA 4.32:	Análise de variância para o T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	87
TABELA 4.33:	Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} à 1,8 mm de deflexão dos compósitos reforçados com fibras longas de longas e longas de vidro.....	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1:	Planta de sisal	10
FIGURA 2.2:	Máquina Paraibana para desfibramento das folhas de sisal	15
FIGURA 2.3:	Máquina automática Nova Floresta para desfibramento das folhas de sisal	15
FIGURA 2.4:	Colocação da fibra de sisal em varais para secar	16
FIGURA 2.5:	Seção transversal da fibra de sisal	17
FIGURA 3.1:	Molde utilizado na produção dos corpos-de-prova de flexão	27
FIGURA 3.2:	Esquema de como foram moldados os corpos-de-prova com as duas fibras longas para flexão	28
FIGURA 3.3:	Desenho fatorial estabelecido para se avaliar a influência dos arranjos de fibra de sisal e vidro na resistência do compósito	29
FIGURA 3.4:	Esquema do ensaio de resistência à flexão em quatro pontos	30
FIGURA 3.5:	Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão na MTS	31
FIGURA 4.1:	Resistência à compressão dos compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro	34
FIGURA 4.2:	Curvas tensão – deformação típicas dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro	37
FIGURA 4.3:	Resistência à tração dos compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.	40
FIGURA 4.4:	Gráfico comparativo da resistência a tração indireta das misturas feitas com fibras curtas de sisal e de vidro.	41
FIGURA 4.5:	Curvas típicas carga – deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal ou vidro	43
FIGURA 4.6:	Curvas típicas carga – deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal ou de vidro	44
FIGURA 4.7:	Comportamento pós fissuração dos compósitos com fibras de sisal ou de vidro.....	48
FIGURA 4.8:	Curvas carga – deflexão típicas dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.....	49

FIGURA 4.9	Carga de primeira fissura para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.....	51
FIGURA 4.10	Módulo de ruptura para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.....	54
FIGURA 4.11	Resultados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão obtidos para compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.....	56
FIGURA 4.12	Comportamento pós fissuração do compósito reforçado com fibras curtas de sisal e de vidro – Relação P/P_f	58
FIGURA 4.13:	Curvas carga – deflexão típicas dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	60
FIGURA 4.14	Carga de primeira fissura para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	62
FIGURA 4.15	Módulo de ruptura para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	64
FIGURA 4.16	Resultados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão obtidos para compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.....	66
FIGURA 4.17	Comportamento pós fissuração do compósito reforçado com fibras curtas de sisal e longas de vidro – Relação P/P_f	68
FIGURA 4.18	Curvas carga – deflexão típicas dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas vidro.....	69
FIGURA 4.19	Carga de primeira fissura para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas vidro.....	71
FIGURA 4.20	Módulo de ruptura para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.....	73
FIGURA 4.21	Resultados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão obtidos para compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e curtas vidro.....	75
FIGURA 4.22	Comportamento pós fissuração do compósito reforçado com fibras longas de sisal e curtas de vidro – Relação P/P_f	78
FIGURA 4.23	Curvas carga – deflexão típicas dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	80
FIGURA 4.24	Carga de primeira fissura para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	82

FIGURA 4.25	Módulo de ruptura para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro.....	84
FIGURA 4.26	Resultados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão obtidos para compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e longas de vidro....	86
FIGURA 4.27	Comportamento pós fissuração do compósito reforçado com fibras longas de sisal e longas de vidro – Relação P/P_f	89

OBJETIVOS GERAIS

- Incentivar a cultura do Sisal como uma das fontes de renda para os agricultores do semi-árido nordestino, através do desenvolvimento de tecnologias que façam um melhor aproveitamento da produção.
- Criar um material de construção alternativo para o cimento-amianto.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver compósitos com fibras de sisal e fibras de vidro, híbridos ou não, variando seu tipo, suas proporções e seu arranjo.
- Ensaiai esses compósitos à compressão simples, tração indireta e flexão em quatro pontos.
- Analisar, comparativamente, as propriedades mecânicas desses compósitos, bem como seu comportamento pós fissuração.
- Concluir qual(is) compósito(s) conseguiu(ram) oferecer melhores condições de utilização, para atender aos objetivos gerais.

Caracterização Experimental de Compósitos Híbridos Fibras de Sisal/Fibras de Vidro – Argamassa de Cimento Portland.

Carolina Pereira Dantas

RESUMO

O uso de fibras vegetais como reforço de matrizes frágeis tem sido bastante estudado em diversas partes do mundo, principalmente nos países não desenvolvidos. Com o objetivo de se incentivar a cultura do sisal como uma das fontes de renda para os agricultores do semi-árido nordestino, e, de criar um material de construção alternativo para o cimento-amianto, desenvolveu-se o presente estudo sobre compósitos argamassa de cimento portland-fibras de sisal/vidro. Estudou-se a hibridação do reforço tanto no que se refere ao tipo de fibra quanto ao seu arranjo. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, tração indireta e flexão. O programa experimental foi estabelecido utilizando-se a técnica de análise fatorial de experimentos. Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura em água e os resultados obtidos indicaram o melhor desempenho da fibra de sisal na elevação da capacidade de absorver energia da matriz frágil e da fibra de vidro na elevação da resistência mecânica dos compósitos. As fibras longas e contínuas mostraram-se mais eficientes que as curtas distribuídas aleatoriamente, tanto no que se refere ao acréscimo de resistência mecânica quanto ao comportamento pós-fissuração do material. A hibridação reduziu a resistência mecânica das misturas reforçadas apenas com fibras de vidro, mas aumentou a resistência mecânica das misturas reforçadas apenas com fibras de sisal, além de modificar a forma das curvas carga-deflexão das misturas reforçadas apenas com fibra de vidro, conferindo-lhes melhor comportamento pós-fissuração para altas deflexões.

Palavras – chave: fibras de sisal, fibras de vidro, compósitos híbridos, resistência mecânica, hibridação, comportamento pós-fissuração.

Experimental Characterisation of Hybrid Sisal/Glass Mortar Composites.

Carolina Pereira Dantas

ABSTRACT

The use of vegetable fibre as reinforcement of cement based matrices has been studied in several parts of the world especially in the undeveloped countries. With the objective of to create a new market to sisal fibre and increase the income of the rural population of the semi-arid region as well as to develop an alternative to asbestos cement products it was established this study on hybrid sisal/glass mortar composites. The influence of fibre type and arrangement was studied in tensile, compression and flexure. The experimental program was established using factorial design of experiments. The tests were carried out after 28 days of cure in water. The results indicated that the low modulus sisal fibre increases the toughness of the composites whereas the high modulus glass fibre improves its strength. Long and continuous fibres were more efficient than short and discontinuous fibres in improving composite strength and toughness. Hybridisation reduced the strength of the mixes reinforced with glass fibres but increased the strength of the sisal fibre composites. Hybridisation changed the shape of the bending load-deflection curves of the glass fibre composites improving its behaviour at higher deflections.

Key – words: sisal fibre, glass fibre, hybrid composites, mechanical strength, and hybridisation.

INTRODUÇÃO

O elevado déficit habitacional observado no Brasil atinge, principalmente, as populações de baixa renda. Especialistas citam como uma das soluções, em virtude dos custos, a adoção de tecnologias alternativas, fáceis de serem utilizadas, que quando não inovadoras, restauram antigas e hoje esquecidas formas de se construir (TOLEDO FILHO et al, 1997d). Portanto, a difusão de novos materiais e desenvolvimento de novos produtos, identificados com a região onde são produzidos, seria bastante útil na solução do problema mencionado. A obtenção desses materiais, deve seguir algumas recomendações, como a utilização de matérias-primas oriundas de fontes naturais e renováveis, que apresentam um reduzido preço de mercado. Dentre essas destaca-se as fibras vegetais, o bambu e a terra crua.

De acordo com TOLÊDO FILHO, R.D. (1997 a), o uso de fibras como reforço de matrizes frágeis de cimento – pastas, argamassas e concreto - tem crescido substancialmente, pois, quando elas são utilizadas, ocorrem modificações nas suas propriedades básicas tais como o aumento da resistência à flexão e da resistência ao impacto e modificações no modo de ruptura do material .

O material de construção reforçado com fibras mais conhecido e utilizado nas construções é o cimento-amianto. Porém, com a divulgação dos danos à saúde provocados pelo asbesto, diversos países proibiram o seu uso. No Brasil, não houve ainda tal proibição mas já existe projeto de lei tramitando no Congresso Nacional que visa tal proibição. Em virtude das preocupações com o uso de tal fibra, uma tendência mundial tem sido observada nos últimos 20 anos no que se refere ao desenvolvimento de compósitos a base de cimento que não usem asbesto como elemento de reforço..

Alguns produtos laminados livres de asbesto já têm sido produzidos comercialmente, utilizando processos industriais tais como o processo de Hatscheck modificado, que utiliza polpa de celulose ou uma combinação de celulose e micro-fibra de polivinil álcool (PVA) como reforço; o processo Reticem, que utiliza redes contínuas fibriladas de polipropileno e o processo Retiver, que usa fibras de vidro em acréscimo às redes contínuas fibriladas de polipropileno como elementos de reforço [XU et al,1996].

Observa-se dos compósitos citados que quase todos utilizam mais de um tipo de fibra como elemento de reforço. Além do uso de diferentes materias (tais como polpa e PVA; vidro e polipropileno) a hibridação pode ocorrer pela combinação de fibras contínuas com descontínuas ou pela combinação de diferentes características geométricas (tais como micro-fibra e fibras) do reforço [NAAMAN, 2000]. A hibridação resulta em compósitos com aumento substancial em propriedades mecânicas quando comparados com os compósitos individuais. Em alguns casos, um aumento sinérgico de propriedades pode ser mesmo observado [XU e HANNANT, 1991].

No presente estudo, buscou-se o desenvolvimento de compósitos híbridos utilizando-se fibras de sisal e fibra de vidro como elementos de reforço de argamassas de cimento portland. Além de se estudar a combinação de diferentes tipos de fibras, estudou-se também a influência da continuidade ou descontinuidade dos elementos de reforço na resistência à compressão, tração e flexão dos compósitos.

A escolha do sisal como elemento de reforço deu-se porque essas fibras apresentam propriedades mecânicas comparáveis às de polipropileno e são abundantes no Nordeste do Brasil que, segundo dados da FAO (1996), é o maior produtor mundial desse tipo de fibra. Em que pese o Nordeste contribuir com 95% da produção nacional do sisal, os dados do IBGE de 1995 indica que tanto sua produção quanto a área plantada têm, nos últimos 10 anos, caído significativamente, já apresentando uma redução de cerca de 50%.

Na Paraíba, estado pioneiro na exploração do sisal como alternativa econômica para a região semi-árida nordestina, a situação é ainda mais crítica. No período compreendido entre 1977-1979, o sisal era o segundo produto mais importante da economia estadual. Nessa época, cerca de 100 mil hectares eram plantados, mais de 100 mil toneladas eram colhidas e a contribuição para o ICMS do estado atingia 2,5%. Atualmente, o estado produz cerca de 8-10 mil toneladas, numa área de 12-15 mil hectares, contribuindo com menos de 0,45% para o ICMS arrecadado no estado (Leal et al, 1997). Apesar de se apresentar em tão grave crise, o setor sisaleiro ainda tem grande importância

social na Paraíba, pois gera empregos para cerca de 100-150 mil pessoas nas várias etapas do seu sistema produtivo.

O decréscimo observado na produção pode ser atribuído, em parte, à competição das fibras sintéticas e, em parte, à falta de uma política governamental clara para a região semi-árida que, com a redução da área plantada, já está enfrentando problemas de desertificação.

É preciso, portanto, se viabilizar novamente a cultura do sisal como alternativa econômica para essa região. O desenvolvimento de tecnologias adequadas que façam melhor aproveitamento da produção e dos seus sub-produtos, resultando conseqüentemente num maior retorno econômico, poderá estimular o retorno de uma cultura de grande importância para nossa região.

A dissertação compõe – se de cinco capítulos e um anexo:

Capítulo 1 – esse capítulo apresenta uma introdução geral da área de interesse do trabalho.

Capítulo 2 – consta de uma revisão de literatura sobre vários aspectos das fibras naturais vegetais, em especial a fibra de sisal, sobre a fibra de vidro e sobre compósitos híbridos.

Capítulo 3 – aqui se apresentam os materiais e a metodologia empregados.

Capítulo 4 – nesse capítulo faz-se a apresentação e análise dos resultados obtidos na experimentação.

Capítulo 5 – sumariza – se as conclusões obtidas.

Anexo I – no anexo I são apresentadas as curvas tensão – deformação. dos resultados dos ensaios de compressão realizados

Anexo II – aqui encontram-se os resultados individuais dos ensaios de flexão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fibras naturais vegetais

As fibras de origem vegetal são produzidas abundantemente em muitos países do terceiro mundo, os ditos em desenvolvimento. Requerem na sua maioria um baixo grau de industrialização, tanto no seu processamento quanto no beneficiamento. Comparando-se, em relação ao equivalente em peso ou volume, com as fibras sintéticas usadas no reforço de compósitos – fibras de aço, de vidro, de prolipropileno, etc. - a energia requerida para a sua produção é pequena; assim como os seus custos.

No Brasil, existem vários tipos de culturas que fornecem fibras de ótima qualidade. A ampliação de seus consumos favoreceria a produção dessas, resultando também em uma melhoria sócio-econômica nas regiões produtoras.

2.1.1- Tipos de fibras vegetais mais comuns:

De acordo com TOLÊDO FILHO (1997a), as fibras naturais vegetais podem ser encontradas de diversas formas:

❖ *Fibras obtidas das folhas:*

- Têm origem nas plantas monocotiledôneas

- Ocorrem em feixes com extremidades sobrepostas, produzindo filamentos contínuos através do comprimento da folha.
 - São ligadas umas às outras por lignina com a função de conferir resistência à folha e dar suporte aos vasos de condução de água do vegetal.
 - São obtidas através do desfibramento mecânico ou manual.
 - Principais: Sisal (*Agave sisalana*), Cantala (*Agave catala*), Canton (Canton), Sansevieria (*Sansevieria*), Caroa (*Caroa*), Pita floja (*Aechmea mogdalene*) e fibra de banana (*Musa sapientum*).
- ❖ *Fibras obtidas do talo ou do tronco:*
- Têm origem em plantas dicotiledôneas.
 - Ocorrem no floema, que fica na entrecasca do talo.
 - Os feixes de fibras são unidos entre si e mantidos no lugar, pelo tecido celular do floema e pelas substâncias gomosas e graxas.
 - Obtém-se as fibras colocando-se os talos em tanques de água quente ou deixados espalhados no chão, permitindo que a ação das bactérias dissolvam o material que as envolve.
 - São usadas essencialmente na indústria têxtil.
 - As principais são: Juta (*Chorchorus*), Rami (*Boehmeria nivea* ou *Boehmeria tenacissemata*), Cânhamo (*Cannabis sativa*), Linho (*Linum usitatissimum*), Sunn (*Crotalaria juncea*), Kenaf (*Hibiscus cannabinus*), Urena (*Urena lobata*) e piaçava (*Attalea funifera*).
- ❖ *Fibras obtidas do lenho ou de madeiras:*
- São, grossas e inflexíveis.
 - São extraídas através de pedaços imersos em várias soluções, e, sujeitos a tratamentos mecânicos.
 - As principais são: fibras de bambu e de bagaço de cana.
- ❖ *Fibras de superfície:*
- Formam uma camada protetora de caules, folhas, frutos e sementes das plantas.

- As principais são: coco e algodão

Por ser o sisal (*Agave sisalana*) uma cultura perfeitamente adaptada às condições climáticas da região semi-árida nordestina, e possuir fibras com propriedades adequadas para reforços em elementos de construções, o presente trabalho, pretende enfatizar o seu estudo visando o aumento do seu cultivo pelos agricultores da região e a melhoria sócio-econômica das populações rurais envolvidas.

2.1.2 – Propriedades Físicas e Mecânicas das Fibras Naturais Vegetais:

Segundo TOLEDO FILHO (1997a) essas propriedades variam de acordo com a idade da planta, com o local do cultivo, com as condições climáticas e microestrutura da fibra, por isso, uma larga faixa de valores será observada, além, também de não existir uma metodologia estabelecida internacionalmente para se medir estas propriedades. A Tabela 2.1 mostra propriedades de algumas fibras vegetais.

TABELA 2.1 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras vegetais, após Tolêdo Filho, 1997b

Propriedades	Sisal	Coco	Piaçava
Diâmetro (mm)	0,08 - 0,3	0,1 - 0,5	0,1 - 0,9
Comprimento (cm)	38 - 94	6 - 23	17 - 218
Peso Específico (KN/m ³)	7,5 - 11	6,7 - 10	8,0 - 11
Absorção de água (%)	190 - 250	85 - 135	38
Resistência à tração (MPa)	227 - 1002	108 - 174	50 - 90
Deformação na ruptura (%)	2,1 - 4,2	13,7 - 41	4 - 6
Módulo de elasticidade (MPa)	11 - 27	2,5 - 4,5	-

2.2 - Fibra de Sisal

2.2.1 - Importância sócio-econômica

Uma das grandes vantagens da cultura do sisal é que a mesma pode ser cultivada em áreas cujas condições de clima e solo são pouco favoráveis à exploração de outras culturas que venham a oferecer resultados econômicos satisfatórios. Isto é, trata-se de uma cultura bem adaptada à áreas de baixa precipitação pluviométrica e solos de baixa fertilidade, caso da região semi-árida do Nordeste (SANTOS, 1991), citado em FARIAS FILHO (1999).

Em termos mundiais, o sisal é produzido na maioria dos países tropicais, quase todos coincidentemente subdesenvolvidos, constituindo importante fonte geradora de renda interna, empregos e receitas cambiais (BAHIA, 1991). A produção mundial dessa fibra no período de 1990 a 1996 é apresentado na Tabela 2.2.

TABELA 2.2 – Produção mundial da fibra de sisal e principais países produtores (em 1.000t)

Fonte: FAO (1996), segundo BARROS et al., 1999, citado em FARIAS FILHO, (1999)

Continente/País	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
África	95,8	94,4	76,7	84,4	83,3	75,0	73,5
Quênia	39,6	39,8	34,1	34,4	33,0	27,9	25,8
Madagascar	16,2	12,2	9,8	13,8	12,6	13,6	13,6
Tanzânia	33,4	36,0	24,3	29,6	30,2	26,2	26,8
América Latina	242,1	237,3	192,7	192,8	205,2	186,1	187,3
<i>Brasil</i>	<i>225,0</i>	<i>220,0</i>	<i>175,4</i>	<i>176,5</i>	<i>188,9</i>	<i>167,8</i>	<i>169,0</i>
Haiti	8,5	8,5	8,5	8,8	8,0	8,0	8,0
Venezuela	8,3	8,5	8,5	8,0	8,0	10,0	10,0
Ásia	25,0	30,0	32,0	32,0	32,0	40,0	40,0
China	25,0	30,0	32,0	32,0	32,0	40,0	40,0
Produção mundial	362,9	361,7	301,4	309,2	320,5	301,1	300,8

A partir da Tabela 2.2 observa-se que o Brasil é o principal produtor mundial da fibra de sisal, embora deva-se destacar o declínio de produção de cerca de 25% observado no período de 1990-1996. No mesmo período a produção mundial caiu apenas 17%. Em termos de área plantada, dados estatísticos referentes ao ano de 1982 indicavam uma área plantada no Brasil de 340.000ha enquanto que em 1996 a área cultivada foi de apenas 120.000ha (LEAL et al. 1997), agravando-se, com isso, a desertificação já constatada no semi-árido nordestino.

Uma das razões para o declínio mundial da produção de sisal, está relacionada com o aparecimento no mercado, das fibras sintéticas. O polipropileno, por exemplo, pode ser produzido a preços mais baixos e com qualidade compatível ou mesmo superior, para a maioria dos fins a que são destinadas as fibras duras naturais, como a fibra de sisal (SILVA, 1996b). No Brasil, a baixa rentabilidade da cultura (em alguns casos prejuízo - o custo de produção do quilo de fibra bruta de sisal em 1997 atingiu R\$ 0,39 enquanto o preço pago ao produtor foi de apenas R\$ 0,33), a baixa produtividade (em torno de 800 Kg/ha contra 2.000Kg/ha dos países africanos); a ausência de uma política agrícola que garanta assistência técnica, creditícia e apoio à comercialização; e o êxodo rural são importantes fatores que explicam a decadência das principais áreas produtoras (BARROS et al., 1999), citado em FARIAS FILHO (1999)

O Brasil exporta cerca de 62% da produção de sisal em forma de fibras e manufaturados tendo obtido receita de cerca de 90-100 milhões de dólares em 1996. Os principais importadores de fios agrícolas industrializados (baler e blinder twine) são os Estados Unidos, Europa, Canadá e Irã. O restante da produção brasileira é consumida na fabricação de fios, cordoalhas, mantas e tapetes, (MAGALHÃES, 1993, citado por BARROS et al., 1999).

Embora o sisal tenha pouca representatividade no valor total das exportações brasileiras e na renda agrícola do país, a sua cultura tem grande importância sócio-econômica para a região Nordeste. Tal fato pode ser evidenciado pelos seguintes aspectos: (i) possibilita a ocupação de uma extensa área de solos pobres da região semi-árida onde vivem algumas das comunidades rurais mais pobres do Brasil; (ii) gera atividade econômica em regiões marginais para lavouras de subsistência, as quais poderiam tornar-se inproveitadas ou sujeitas a erosão e a desertificação devido a movimentação periódica dos solos; (iii) é importante agente de fixação do homem na região semi-árida nordestina representando fonte de renda e emprego para um contingente de aproximadamente um milhão de pessoas. Infelizmente são empregos que geram renda

familiar inferior a US 50/mês e fazem uso de mão-de-obra infantil.; (iv) trata-se de cultura ecológica, visto que inexistem usos de defensivos e adubos químicos; (v) constitui fonte geradora de renda e emprego, durante o período da entressafra; (vi) é fonte geradora de divisas para os Estados produtores uma vez que essa cultura faz parte da pauta de exportação; (vii) constitui de atividade de apoio à pecuária, nas fazendas do semi-árido, quer pela utilização da planta na alimentação ou como pastagem nas áreas exploradas com a cultura, (LEAL, 1997) citado em FARIAS FILHO (1999).

2.2.2 - Botânica e morfologia do sisal

O sisal pertence à classe monocotiledônea, série Liliiflôrea, família Agavaceae, subfamília Agavoidea, gênero *Agave*, espécie *A. sisalana*. O gênero acha-se subdividido em dois subgêneros, distintos, segundo as características do escapo floral: *Littaea* e *Euagave*. No primeiro as plantas apresentam escapo floral especiforme, com flores agrupadas em fascículos de 2 a 8 na axila das brácteas ao longo do pedúnculo florífero (MOREIRA et al. 1999). Esse subgênero abarca 80 espécies, (BERGER, 1915, citado por MOREIRA et al. 1999), no segundo, o escapo floral é do tipo paniculado, com ramificação em forma de candelabro, esse subgênero comporta 170 espécies (MEDINA, 1954). No segundo gênero, as poucas espécies de interesse comercial para a produção de fibras fazem parte da seção *Rigidea* e do subgênero *Euagave* (MOREIRA, et al. 1999).

Duas espécies destacam-se no gênero por sua importância comercial a *A. sisalana* e a *A. fourcroydes*. O sisal cultivado no Nordeste do Brasil pertence a *A. sisalana*, enquanto que a segunda espécie é explorada no México para a produção de cordas e cabos para embarcações.

O sisal possui sistema radicular fibroso e em forma de tufo, as raízes brotam adventiciamente da base da escara das folhas e na superfície inferior do tronco. O sistema radicular tem aproximadamente 3,0 m de diâmetro e 1,0 a 2,0 m de profundidade. A planta não possui caule mas há, no entanto, um tronco ou eixo principal onde inserem-se as folhas e o broto terminal. A folha de sisal é lanceolada linear e destituída de pecíolo. Sua parte superior é côncava e a inferior é convexa. Quanto as dimensões, é mais comprida que larga e afunilada quando aproxima-se da extremidade que é ocupada pelo espinho. A epiderme da folha é bem desenvolvida, cutícula cerosa, que repele água com facilidade. Entre as

duas epidermes encontra-se o mesófilo interno da folha. O parênquima é esponjoso, constituído de numerosas células com paredes delgadas e diferentes quanto ao tamanho. No parênquima acham-se embebidas as fibras, que são responsáveis pelo reforço e pela rigidez das folhas (MOREIRA et al, 1999).

O sisal é um vegetal do tipo monocárpico, isto é, floresce uma vez durante o ciclo de crescimento e desenvolvimento, posteriormente a planta morre. A flor do sisal é hermafrodita e está agrupada em cachos situados no final de cada ramo da panicula. Na polinização, o pólen dos ramos superiores pode, por gravidade, cair no estigma das flores dos ramos inferiores, no entanto, normalmente a polinização natural é realizada por insetos, principalmente as abelhas que são atraídas pela grande quantidade de líquido viscoso secretado pelo tubo de perianto, durante a ântese (MOREIRA et al., 1999). A Figura 2.1 mostra a planta de sisal.

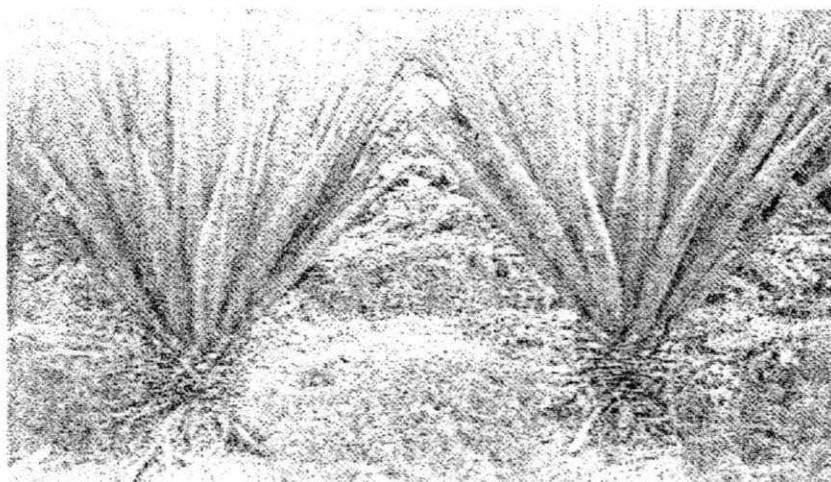


FIGURA 2.1: Planta de sisal

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

2.2.3 - Solo e Clima

O sisal é uma planta que se adapta bem às regiões tropicais ou subtropicais, suportando secas prolongadas e elevadas temperatura (MARQUES, 1978).

O clima ideal para o crescimento e o desenvolvimento das agaves é o quente, com temperaturas média anual entre 20 e 28°C, e grande intensidade de luz, precipitações não excessivas e regulares. Nos períodos das secas prolongadas, as folhas

perdem a turgescência e pendem, recuperando-se após algumas chuvas (NETO & BELTRÃO, 1999). O sisal como planta semixerófila, apresenta estrutura peculiares de defesa contra as ações da aridez, com folhas carnosas, número reduzidos de estômatos e epiderme fortemente cutinizada (MEDINA, 1959), citado em FARIAS FILHO (1999).

As regiões produtoras de sisal no Nordeste brasileiro apresentam altitude entre 209 e 1.012 m, precipitação pluvial entre 335,8 e 863,1 mm, concentradas entre 3 a 6 meses por ano. Os solos nas áreas em que se cultivam o sisal no nordeste, apresentam capacidade de armazenamento entre 50 e 125 mm, a evapotranspiração excede a precipitação anual total (NETO & BELTRÃO, 1999). O sisal adapta-se bem aos solos silicosos, silico-argilosos, soltos e profundos, dotados de bom teor de calcário. Preferem solos levemente ácidos ou alcalinos com ph variando de 5 a 8, (PRATA, 1983), produz também em solos rasos, rochosos e pobres (LUTZENBERGER, 1974), mas não adapta-se bem a terrenos úmidos (NETO & BELTRÃO, 1999), nem alagados com elevado teor de matéria orgânica, (GRANNER & GODOY JUNIOR, 1967).

2.2.4 - Cultivo

No Nordeste, dois tipos de sisal têm sido utilizados pelos produtores que são: *Agave sisalana* ou sisal comum e o híbrido 11648, originário da África (SOUZA SOBRINHO et al., 1985). Como a indústria utiliza as fibras de sisal para produção de fios, cordas e cabos, a *Agave sisalana* apresenta-se com excelência para esses fins devido ao comprimento da folhas e a resistência da fibra, apesar de apresentar menor número de folhas/planta e menor rendimento de fibra/ha, em relação ao híbrido 11648. Os híbridos apresentam como vantagens serem mais resistentes à seca, o que possibilita a colheita durante todo o ano, (BEZERRA, et al., 1991, citado por SILVA et al. 1999).

O sisal é propagado vegetativamente por bulbilhos ou por rebentões. Os bulbilhos são produzidos no escapo floral sendo necessário o produtor levar em consideração alguns pontos tais como: *i*) preparo de viveiros: os bulbilhos devem apresentar tamanho superior a 10 cm; *ii*) o porte, vigor, crescimento do pendão floral da planta mãe; *iii*) o transplante da nova planta para o local definitivo só deverá ocorrer após essa nova planta atingir 40 cm de altura. A reprodução por meio de rebentões requer os seguintes cuidados: *i*) a planta mãe em boas condições fitossanitárias e desenvolvimento

vegetativo; *ii*) selecionar os rebentões quanto a idade, tamanho e diâmetro do bulbo; *iii*) evitar rebentões, da planta-mãe que tenha emitido o pendão floral; *iv*) recomenda-se para o plantio dos rebentos, mudas com 40 a 50 cm de altura, com 12 a 15 folhas. A escolha das mudas deve ser definida levando-se em consideração principalmente o fator economia, posto que não existe diferença significativa quanto a produtividade, qualidade da fibra ou longevidade das plantas, quando utilizados para o plantio do sisalais, a propagação por meio de bulbilhos ou rebentões (MEDINA, 1963 citado por SILVA et al. 1999).

O espaçamento mais utilizado pelos produtores, principalmente os paraibanos, é o de 2 m x 1 m, em fileira simples, conseguindo-se assim uma população de 5.000 plantas/ha. Plantios que seguem recomendações técnicas, utilizam espaçamentos mais largos 2,5m x 0,80m ou 2,80m x 0,70m, mantendo-se assim a mesma população, entretanto, viabilizam o consórcio com culturas intercalares nos dois primeiros anos, além de facilitarem a mecanização principalmente no roço e transporte das folhas na época da colheita. Já o espaçamento 3m x 1,80m, reduz a densidade para 1.850 plantas/ha, todavia possibilita o consórcio com a pecuária bovina, caprina ou ovina, além de permitir a produção de folhas mais longas, (SILVA, et al., 1999).

Como outras culturas, o sisal é sensível à concorrência com ervas invasoras, especialmente nos primeiros dois anos. Recomendam-se no primeiro ano, duas a três capinas, já no segundo ano uma a duas capinas dependendo da incidência de ervas daninhas. Esses tratamentos, dependendo do espaçamento, podem ser feitos à tração animal ou mecanizada, utilizando-se grades leves, e complementando-se em ambos os casos com limpa manual entre as plantas.

2.2.5 - Colheita e obtenção das fibras

A primeira etapa consiste no corte das folhas. Na *Agave sisalana* é possível realizar o primeiro corte 36 meses após o plantio, enquanto que no híbrido 11648, em média aos 48 meses. O corte é feito manualmente. Em geral a planta de sisal é submetida a um corte por ano. Não se faz necessário obedecer exatamente o intervalo de 12 meses. Dependendo da conjuntura do mercado, pode o produtor antecipar ou protelar o corte. Normalmente a *Agave sisalana* apresenta uma produção média de 180 a 250 folhas/ciclo/planta, enquanto que o híbrido 11648 a produção média de 600

folhas/ciclo/planta. O ciclo da planta dura em média 8 a 10 anos, em ambas as variedades.

No processo de colheita, as operações de corte, enfeixamento, transporte e desfibramento devem ser sincronizadas, ou seja, as folhas cortadas devem ser desfibradas no mesmo dia, evitando-se assim o murchamento, pois se ocorrer esse processo irá dificultar o desfibramento, e favorecer a fermentação e depreciação da fibra.

O desfibramento do sisal é a operação mais complexa e de maior custo. No Brasil, na extração da fibra (desfibramento) utiliza-se uma máquina denominada de “motor de agave” ou “máquina Paraibana”, (Figura 2.2). Por sua simplicidade, apresenta baixa capacidade operacional (em torno de 150 a 200 Kg de fibra seca em um turno de 10 h/dia), causa um desperdício de 20% a 30% das fibras e envolve grande número de pessoas para sua operacionalização, (SILVA et al., 1993). A fadiga dos trabalhadores, aliada à falta de segurança da máquina, expõe os operadores a constantes riscos de acidentes, constituindo-se um dos principais problemas no uso da máquina. Devido ao baixo custo, facilidade de manutenção, simplicidade e rusticidade, a máquina Paraibana ainda tem grande aceitação principalmente entre os pequenos e médios produtores. Outras máquinas desfibradoras foram desenvolvidas, como por exemplo a desfibradora automática de sisal, chamada Brasilana e máquina Nova Floresta (Figura 2.3). Após várias avaliações, a máquina Nova Floresta apresentou capacidade operacional equivalente a três máquinas Paraibanas e perdas de fibras no desfibramento significativamente (SILVA, et al., 1999).

Segundo CARVALHO FILHO (1997), a obtenção das fibras de sisal envolve as seguintes atividades no campo e nas unidades de beneficiamento:

- ◆ Na época adequada para a colheita, essa é feita por trabalhadores braçais, através de uma foice curvada, cortando a folha próxima de sua base. Deve-se manter intactas de 4 a 5 folhas, além do estame central de folhas fechadas, denominado de vela; para garantir o ciclo vegetativo da planta. Cada planta fornece, em média, 15 a 20 folhas por colheita.

- ◆ Concluído o corte, as folhas são levadas até o local em que se encontram as máquinas de desfibramento, onde empilhadas, facilitam o manuseio.

- ◆ As folhas são introduzidas uma a uma, inicialmente colocando-se até o terço médio do seu comprimento, sendo então retiradas e entregues ao segundo puxador que as introduz até a parte não raspada. Busca-se sempre evitar a formação de “anéis”, ou seja, trechos não raspados. No primeiro corte, as folhas rendem de 2% a 2,5% de fibras, em

relação a seu peso; em cortes posteriores sobem a valores de 3% a 5,5%, resultando num rendimento médio de 3% de fibras.

♦ Após o beneficiamento, as fibras se apresentam com uma coloração amarelo-esverdeada, indicando a existência de um certo nível de mucilagem, que precisa ser eliminada. Para isso faz-se uma lavagem por imersão em tanque d'água, no período da noite (12 a 15 horas). Após a lavagem estende-se os feixes de fibras em um leito de areia, ao ar livre e expostos ao sol, por igual período, para a secagem e o branqueamento, através dos raios solares. A umidade resultante gira em torno de 14%.

♦ Feita a secagem, as fibras são transportadas para os depósitos de armazenagem das unidades de beneficiamento. Nessas unidades proceder-se-ão as etapas de escovagem, batadura e seleção das fibras.

As fibras também podem ser expostas em varais para secar. A Figura 2.4 mostra isso.

Para melhoria na qualidade da fibra, submete-se essas ao batimento e ao penteamento, para remoção do pó, do tecido parenquimatoso e retirada das fibras mais curtas, resultando num produto limpo, brilhoso, macio e valorizado; apesar de que, a maioria dos produtores comercializam sua produção da forma bruta, isto é, sem nenhum processo de beneficiamento, (SILVA et al., 1999).

Após o batimento as fibras são selecionadas de acordo com o padrão de classificação, baseado no comprimento medido em centímetros. Fibra extralonga possui comprimento maior que 1,10 m, fibra longa tem comprimento entre 0,90 m e 1,10 m, a fibra média vai de 0,71 m até 0,90 m e a curta de 0,60 m até 0,70 m. Quanto a qualidade, a fibra de sisal classifica-se em quatro tipos (i) tipo superior – fibras lavadas, secas e bem batidas ou escovadas, de coloração creme-clara, macias, brilhosas e resistentes, umidade máxima de 13,5%, isentas de manchas, impurezas, entrançamentos, nós, fragmentos de fibras ou quaisquer outros defeitos; (ii) tipo 1 - fibras secas, bem batidas ou escovadas, coloração creme-clara ou amarelada com pequena variação em relação à cor, umidade máxima de 13,5%, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas e quaisquer outros defeitos; (iii) tipo 2: fibras secas e bem batidas ou escovadas, coloração amarelada ou pardacenta, com pequenas extensões esverdeadas, ligeiramente ásperas, umidade máxima de 13,5%, isentas de impurezas, entrançamentos, nós e cascas; (iv) tipo 3: fibras secas, bem batidas ou escovadas, coloração amarelada, com parte de tonalidades esverdeadas, pardacenta ou avermelhada, com brilho e resistência normais, ásperas, manchas com variação bem acentuada quanto à cor, soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas,

entrançamentos, nós e cascas. O refugo é composto de fibras de sisal com comprimentos inferiores a 0,60m e características que não se enquadrem nos tipos descritos anteriormente, (BRASIL, 1987; 1989, citado por SILVA, et. al. 1999).

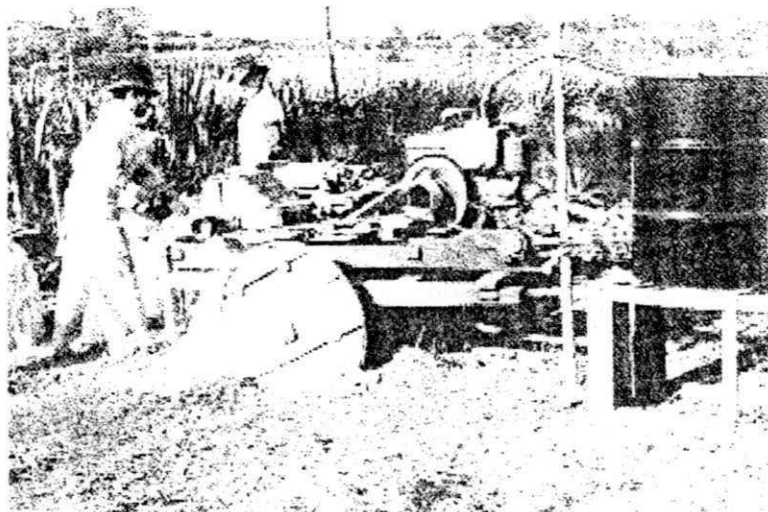


FIGURA 2.2: Máquina Paraibana para desfibramento das folhas de sisal

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

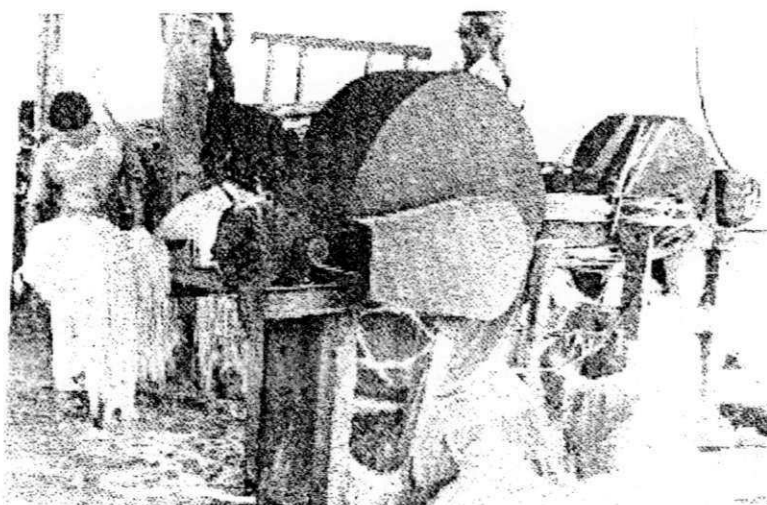


FIGURA 2.3: Máquina automática Nova Floresta para desfibramento das folhas de sisal

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)



FIGURA 2.4: Colocação da fibra de sisal em varais para secar

Fonte: (SILVA, O.R.R.F., et al., 1999)

2.2.6 – Micro - estrutura das fibras de sisal

De acordo com TOLÊDO FILHO (1997a), as fibras naturais vegetais diferem significativamente em sua aparência física, mas possuem similaridades que as identificam como uma família. As características das fibras dependem das propriedades dos seus constituintes individuais, da estrutura fibrilar e da matriz lamelar.

A fibra de sisal é composta de numerosas fibro-células alongadas fusiformes que se adelgaçam de forma cônica na direção das extremidades. As fibro-células são unidas pelas lamelas médias as quais são constituídas de lignina, hemicelulose e pectina. Fisicamente, cada fibro-célula é constituída de quatro partes: a parede primária, a parede secundária, a parede terciária e o lúmen. Cada parede das células é formada de várias camadas de estrutura fibrilar composta por fibrilas de estrutura reticulada, paralela ou espiral. As fibrilas são compostas de micro-fibrilas, com espessura de 20 nm, que por sua vez são formadas por cadeias moleculares de celulose com espessura de 0,7 nm e comprimento de poucos μm .

Quimicamente a fibra de sisal é constituída de celulose (70%), hemicelulose (12%), lignina (10%), pectina e substâncias graxas

A Figura 2.5 apresenta a micro-célula de uma fibra de sisal.

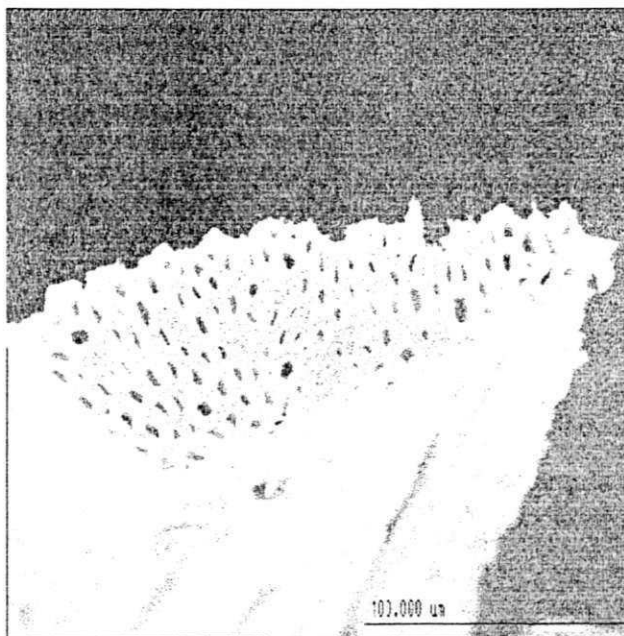


FIGURA 2.5: Seção transversal da fibra de sisal

Fonte: (TOLÊDO FILHO, 1997a)

2.2.7 – Propriedades físicas e mecânicas

Apresentam-se a seguir as propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal. A Tabela 2.3 apresenta uma larga faixa de valores, visto que tais propriedades dependem da idade da planta, local do cultivo e condições climáticas. Nessa Tabela mostram-se valores para as seguintes propriedades: diâmetro (ϕ), comprimento (l), peso específico (γ), absorção de água (ABS), resistência à tração (f_t), módulo de elasticidade (E) e deformação de ruptura (ϵ_{fu}) das fibras.

TABELA 2.3: Propriedades físicas e mecânicas da fibras de Sisal (TOLÊDO FILHO, 1997a)

Origem: Referência	ϕ (mm)	l (cm)	γ (kN/m ³)	ABS (%)	f_t (MPa)	E (GPa)	ϵ_{fu} (%)
Brasil: Ref.: Agopyan, 1990	0,2-0,3	-	12-13	123-137	374-378	-	5-5,5
Brasil. Ref.: CEPED, 1982	-	-	12,7	240	458	15,2	4,2
Origem: Ref.: Chand, 1988	0,05-0,3	-	14,5	-	530-640	9-22	3-7
Índia. Ref.: Mukherjee, 1986	0,1-0,3	-	14,5	-	530-630	17-22	4,3
Origem: Ref.: Nilsson, 1975	0,3-0,5	-	-	-	620	-	-
Brasil. Ref.: Tolêdo Filho, 1990	0,08-0,3	38-94	7,5-11	190-250	227-1002	11-27	2,1-4,2

A Tabela 2.4 apresenta a composição química e a morfologia das fibras de sisal.

TABELA 2.4 – Composição química e morfologia das fibras de sisal após GRAM, H.E. (1983), citado por TOLÊDO FILHO (1997a)

Tipo de fibra	Celulose (%)	Hemi-celulose (%)	Lignina (%)	Ângulo espiral (°)	Comprimento da célula (mm)	Largura da célula (µm)	Espessura da parede (µm)
Sisal	70	12	10	20	2,5	25	12,5

2.3 - Fibras de vidro

Filamentos contínuos de fibras de vidro são produzidos em um reservatório ou tanque, que possuem a base de platina com centenas de furos. Nesse reservatório ocorre a fusão do vidro em estado natural. Sob o efeito da gravidade, o vidro fundido irá atravessar os furos da base do reservatório dando origem a finos filamentos que caem em um volante que gira em alta velocidade, provocando o resfriamento rápido dos fios [HULL, 1992].

Segundo HULL, D. (1992), muitas composições diferentes de vidro mineral, têm sido usadas na produção de fibras. A mais comum é baseada em sílica (SiO_2) com adição de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. Composições típicas de três vidros usados como fibras, em materiais compósitos são citadas na Tabela 2.5:

TABELA 2.5 – Composições típicas de vidros usados na produção de fibras, segundo HULL, D. (1992)

	Vidro E	Vidro C	Vidro S
SiO_2	52,4	64,4	64,4
$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
$\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$	0,8	9,6	0,3
Ba_2O_3	10,6	4,7	-
BaO	-	0,9	-

◆ O Vidro E (E de elétrico) é o mais comumente usado, pois tem boa resistência, rigidez, propriedades elétricas e de durabilidade, além de ter boa capacidade de sustentação.

◆ O Vidro S é mais caro que o E, mas possui um melhor módulo de elasticidade e maior resistência ao calor. Seu uso justifica-se apenas em aplicações especiais, como nas indústrias de aviões.

◆ O Vidro C (C de corrosão), tem maior resistência à corrosão química que o E, mas além de ser mais caro, possui propriedades de resistência mais baixas.

A Tabela 2.6 apresenta algumas propriedades da fibra de vidro tipo E utilizada no presente estudo [HULL, 1992].

TABELA 2.6 – Propriedades da fibra de vidro, de acordo com HULL (1992)

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Diâmetro (μ m)	Deformação na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Mód. de elasticidade (GPa)
Vidro E	2,5	8 - 14	1,8 - 3,2	1400 - 2500	76

2.4 - Compósitos híbridos

A relação entre o módulo de elasticidade das fibras e o da matriz de cimento possui grande influência no comportamento mecânico dos compósitos. Fibras de alto módulo e resistência possuem boa aderência com as matrizes de cimento e podem ser utilizadas para aumentar a resistência do compósito, enquanto que fibras de baixo módulo, apresentando uma baixa aderência às matrizes, podem ser utilizadas para aumentar a sua ductilidade [PELED, et al., 2000].

Compósitos híbridos, contendo dois ou mais tipos de fibras, podem ter as suas propriedades controladas desde que para isso tome-se vantagem das fibras de alto módulo e resistência e de fibras de baixo módulo. Qualquer tipo de fibra, com várias formas e comprimentos, podem ser utilizadas na constituição de compósitos híbridos a base de cimento. A combinação ótima das fibras e dos seus volumes e arranjo dependem do uso final a que o produto se destina.

Estudos reportados na literatura indicam o uso de fibras de vidro, polipropileno, polivinil álcool (PVA), “wiskers” de alumina e de carbono, polpa de celulose e micro e macro fibras de aço como reforço de compósitos híbridos a base de cimento [XU et al, 1991, 1996, 1998 e 1998a; MOBASHER e LI, 1996; PELED et al. 2000; BANTIA et al., 2000].

XU et al, (1991, 1996, 1998 e 1998a) estudaram o efeito da incorporação de várias combinações de redes fibriladas de polipropileno e de fibras de vidro na resistência à

tração e flexão de argamassas especiais de cimento portland-cinzas volantes. Os autores observaram que o compósito resultante apresentam propriedades mecânicas bastante superiores às dos compósitos individuais. Por exemplo, a deformação no final da fase de múltipla fissuração e a largura das fissuras dentro dessa região eram inferiores nos compósitos polipropileno-vidro que em todos os outros compósitos reforçados apenas com polipropileno. A deformação na qual as fibras de vidro mantinham sua tensão máxima foram aumentadas consideravelmente pela presença da rede de polipropileno o que conduziu a uma capacidade de suportar cargas (até 1,5% de deformação) maior que nos compósitos individuais ou na soma de suas componentes. Na carga de pico, onde as fibras de vidro falham, os compósitos híbridos não romperam e uma carga substancial foi mantida continuamente em virtude da alta deformabilidade do polipropileno o que significativamente aumentava a resistência do compósito ao impacto.

MOBASHER e LI (1996) usaram “whiskers” de carbono e de alumina associadas às fibras de polipropileno como reforço de argamassas de cimento-fumo de sílica. Um aumento significativo, de cerca de 75%, foi observado na resistência dos compósitos híbridos quando comparada com a da matriz ou do compósito reforçado apenas com polipropileno. As fibras de polipropileno atuaram dando ductilidade ao compósito após ser atingida a tensão de pico.

Compósitos extrudados contendo fibras de polipropileno, vidro ou PVA foram estudados por PELED et al., 2000. O comportamento em flexão dos compósitos contendo cimento, fumo de sílica e cinzas volantes como materiais cimentantes foi examinado e os resultados indicaram que a adição de PVA a um compósito polipropileno-vidro aumentou tanto a resistência quanto a ductilidade do compósito, conduzindo a uma resposta com “strain-hardening” (endurecimento). A durabilidade de compósitos vidro-polipropileno foi superior à de compósitos reforçados apenas com fibras de vidro.

BANTIA et al. (2000) estudou o efeito da adição de micro e macro fibras de aço na resistência à compressão e flexão do concreto. Os resultados obtidos indicaram que os compósitos híbridos apresentavam maior resistência à compressão, flexão e ductilidade.

Observou-se, que fibras de vidro e sisal têm sido utilizadas como reforço de matrizes poliméricas [PAVITHRAN et al., 1991; KALAPRASAD, KURUVILLA e THOMAS, S. 1994]

PAVITHRAN et al. (1991) mostraram que a adição de uma pequena quantidade de fibra de vidro ao compósito sisal-polímero iria não apenas lhe acrescentar propriedades mecânicas, como também melhorar as suas características físicas.

KALAPRASAD et al. (1994) determinaram as propriedades mecânicas de um compósito híbrido de polietileno de baixa densidade reforçado com fibras curtas de sisal e de vidro. A fração volumétrica das duas fibras, orientação e o efeito do tratamento da fibra de sisal com sódio foram variáveis do estudo. Os autores concluíram que com a adição de fibras de vidro numa fração volumétrica de 3%, orientadas longitudinalmente, houve um acréscimo de 80% na resistência à tração do material. Quando a fibra de sisal foi tratada e acrescentou-se a mesma proporção anterior de fibra de vidro, obteve-se um aumento de mais de 90% na resistência à tração, e de 60% na resistência à flexão. Observou-se ainda que a tendência de absorver água do material diminuiu com a hibridização.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

Nesse capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados durante a pesquisa. As normas utilizadas estão citadas e referenciadas.

3.1 – MATERIAL

3.1.1 – Fibras de sisal

Foi utilizada a fibra de sisal produzida em Pocinhos, município situado no semi-árido paraibano. No preparo dos corpos de prova foram usadas fibras longas e fibras curtas, variando-se as proporções e o arranjo. As fibras curtas possuíam comprimento de 25 mm e as longas de 300 mm. As propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal produzida no município de Pocinhos foram obtidas em um trabalho feito por TOLÊDO FILHO (1997a) e os resultados estão apresentados na Tabela 2.3 do capítulo 2. A composição química e morfologia constam na Tabela 2.4, do capítulo 2.

3.1.2 – Fibra de vidro

A fibra de vidro foi adquirida no comércio de Campina Grande. No preparo dos corpos de prova foram usadas, também, fibras longas e fibras curtas, variando-se as proporções e o arranjo. As fibras curtas possuíam comprimento de 25 mm, e, as longas de 300 mm. As propriedades físicas e mecânicas da fibra de vidro foram obtidas por HULL (1992) e os resultados estão apresentados na Tabela 2.6 do capítulo 2.

3.1.3 - Cimento portland

Durante o preparo das misturas, utilizou-se o cimento portland comercial composto com filler, CP II – F – 32. O cimento estava embalado em sacos de papel do tipo “Kraft” de 25 Kg. Para evitar a hidratação prematura do cimento, os sacos de papel foram colocados em plásticos, devidamente lacrados. A finura do cimento foi determinada medindo-se a quantidade de material retida na peneira ABNT n° 200 (0,074mm). Uma amostra do material foi enviada para o Laboratório de Análises Minerais - LAM, do CCT/PRAI/UFPB, Campus II, a fim de se proceder a análise química do mesmo. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela a seguir:

TABELA 3.1– Composição Química do Cimento

PR (Perda ao rubro)	5,58%
SiO ₂ (Óxido de Silício)	17,32%
RI (Resíduo insolúvel)	0,41%
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	1,40%
Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio)	6,70%
CaO (Óxido de Cálcio)	56,00%
MgO (Óxido de Magnésio)	11,28%
Na ₂ O (Óxido de Sódio)	0,06%
K ₂ O (Óxido de Potássio)	0,73%

3.1.4 – Areia

A areia utilizada nas misturas, era proveniente do leito do rio Paraíba. A mesma foi seca em estufa, antes de ser utilizada na moldagem dos corpos de prova. Foi obtida a granulometria da areia segundo a NBR – 7117/87, constatando-se um módulo de finura (MF) de 2,49.

3.1.5– Água

Foi utilizada água potável fornecida pela CAGEPA – Companhia de Abastecimento de Água e Esgotos da Paraíba.

3.2 - MÉTODOS

Além de compósitos reforçados com fibras curtas e longas de sisal ou vidro, foram produzidos compósitos híbridos nas seguintes combinações:

- Fibras curtas de sisal com fibras curtas de vidro
- Fibras curtas de sisal com fibras longas de vidro
- Fibras longas de sisal com fibras curtas de vidro
- Fibras longas de sisal com fibras longas de vidro

A seguir, apresentam-se as variáveis, com as quais foram feitas **todas as combinações possíveis**, mantendo-se a proporção cimento:areia:água constante e igual a 1:1,5:0,5.

TABELA 3.2 – Variáveis utilizadas no estudo

Tipos de fibra	Comprimentos	%
SISAL (S)	Curta (25 mm)	0; 1; 2; 3,14
	Longa (300 mm)	0; 1; 2; 3,14
VIDRO (V)	Curta (C)	0; 1; 2; 3,14
	Longa (L)	0; 1; 2; 3,14

3.2.1 - Método de confecção dos corpos de prova

3.2.1.1 – Compósitos com fibras curtas

A mistura feita com fibras curtas foi produzida utilizando-se uma argamassadeira de 15 litros, seguindo-se as seguintes etapas:

- Colocou-se toda a areia na argamassadeira, ligando-se a mesma;
- Adicionou-se 40% da quantidade total de água;
- Colocou-se, primeiro, a fibra de sisal, depois a fibra de vidro, aos poucos, sem amontoá-las, evitando-se a formação de novelos. Cerca de 30 a 35% da quantidade de água da mistura era progressivamente adicionada durante esse estágio para manter a mistura úmida e trabalhável;
- Adicionou-se o cimento;
- Acrescentou-se a água restante;
- Continuou-se misturando até se obter uma boa dispersão das fibras na mistura

g) Colocou-se nos moldes. Para os ensaios de compressão simples seguiu-se a norma NBR – 7215 (ABNT – NBR 7215) e de tração indireta a NBR – 7222 (ABNT – NBR 7222). Colocou-se um relógio comparador para se medir as deformações, anotando-se as mesmas. Para flexão, o método de ensaio será descrito posteriormente.

Os corpos de prova foram mantidos nos respectivos moldes, cobertos com um pano úmido, durante as primeiras 24 horas e, após esse período foram curados imersos em água até a idade de 28 dias.

Para o ensaio de flexão, os corpos de prova possuíam dimensões internas de 300mm x 60mm x 12,7mm. O molde era fixado a uma mesa vibratória e a vibração executada, sem se promover segregação da mistura, até a remoção das bolhas de ar aprisionado. A Figura 3.1 mostra o molde utilizado.

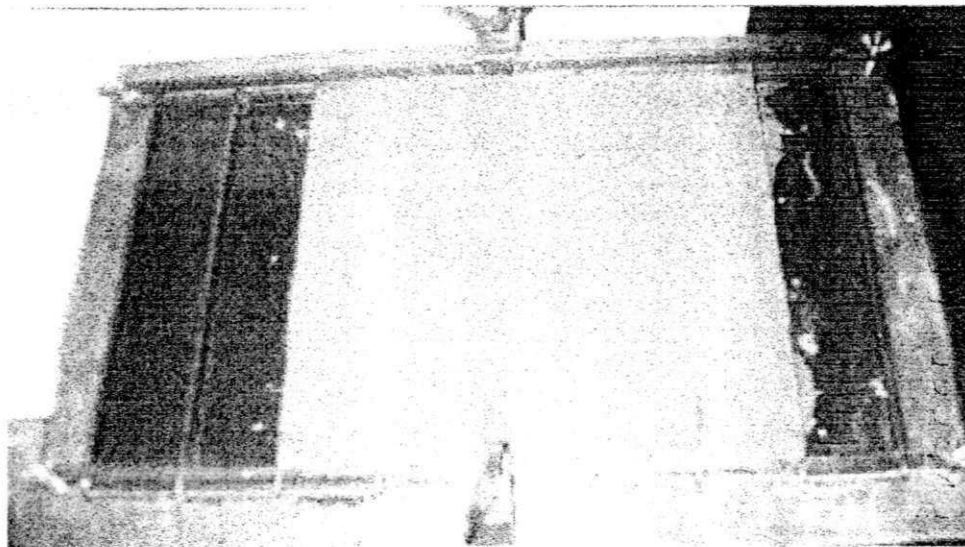


FIGURA 3.1: Molde utilizado na produção dos corpos de prova de flexão

Três corpos de prova foram moldados para cada tipo de mistura estudada e a cura foi realizada seguindo-se o mesmo procedimento adotado nos ensaios de compressão e tração indireta.

3.2.1.2 – Compósitos com fibras longas

Apenas corpos de prova de flexão foram moldados com fibras longas de sisal ou vidro. Eles foram moldados, colocando-se primeiro, uma fina camada da mistura

vinda da argamassadeira, e, sobre essa camada, as fibras longas, penteadas, ao longo do molde; em seguida, preenchia-se o restante do molde, com o material vindo da argamassadeira. Em se usando as duas fibras longas, as mesmas eram divididas por um pouco de argamassa, como ilustra o esquema a seguir:

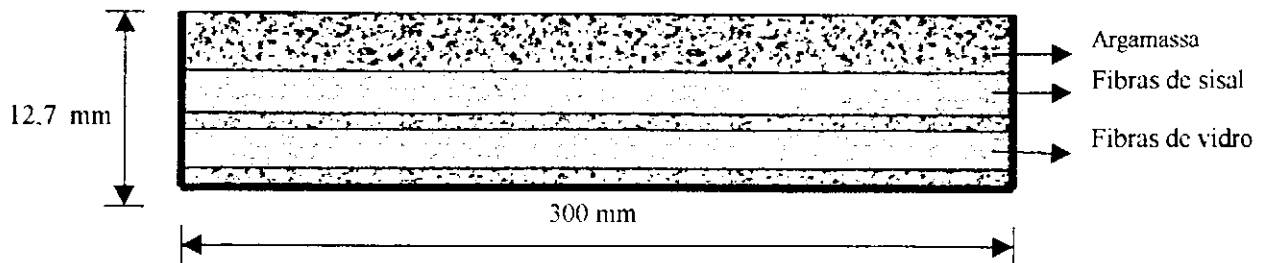


FIGURA 3.2: Esquema de como foram moldados os corpos de prova com as duas fibras longas para flexão

3.2.2 - Resistência mecânica do compósito

A resistência mecânica dos compósitos foi determinada através da realização de ensaios de resistência à compressão simples, à tração indireta e à flexão.

O programa experimental para se analisar a influência dos arranjos de fibra de sisal e vidro, através da resistência à compressão, tração indireta e flexão do compósito foi estabelecido utilizando-se um método estatístico, chamado análise fatorial de experimentos. A técnica do desenho fatorial foi selecionada, em oposição ao clássico “experimento um de cada vez”, visto que a mesma possibilita uma abordagem eficiente e estruturada, para se estudar a influência de um grande número de variáveis, nas propriedades do material. Através do desenho fatorial é possível que seja determinado, se os principais fatores que afetam a propriedade em estudo foram levados em consideração; qual dos fatores tem efeito significativo nessa propriedade e se existe interação entre os fatores. Adicionalmente, o uso do desenho de experimentos conduz a um modelo matemático que permite prever o valor da propriedade em estudo em função dos fatores considerados.

Para se ter um desenho fatorial completo deve-se estabelecer, para cada fator, um número de níveis a serem investigados. O nível de cada variável em um experimento pode cobrir uma grande faixa de valores. O propósito de um desenho de experimentos não é testar os extremos de um processo, mas testar uma área racional de

interesse prático no espaço dos fatores. Se uma variável é significativa e os resultados obtidos em um nível mais baixo mostram que é aconselhável a avaliação da variável dependente de um nível mais alto, experimentos subsequentes podem ser realizados para explorar esse novo nível.

No presente trabalho foram usados desenhos fatoriais, com dois níveis, dois fatores e três reproduções, cada, para se estudar a influência do arranjo, do tamanho e das proporções das fibras de sisal e vidro, no compósito. Os fatores estudados foram: porcentagem e/ou arranjo da fibra de sisal (X1) e porcentagem e/ou arranjo da fibra de vidro (X2). O uso do desenho fatorial vai determinar, no entanto, como estes fatores afetam a resistência do compósito.

A proporção cimento:areia:água foi mantida constante e igual a 1:1,5:0,5 em todo o estudo. O desenho fatorial é mostrado na Figura 3.3 onde os limites mais baixos e mais altos selecionados para cada fator são apresentados nos eixos da figura.

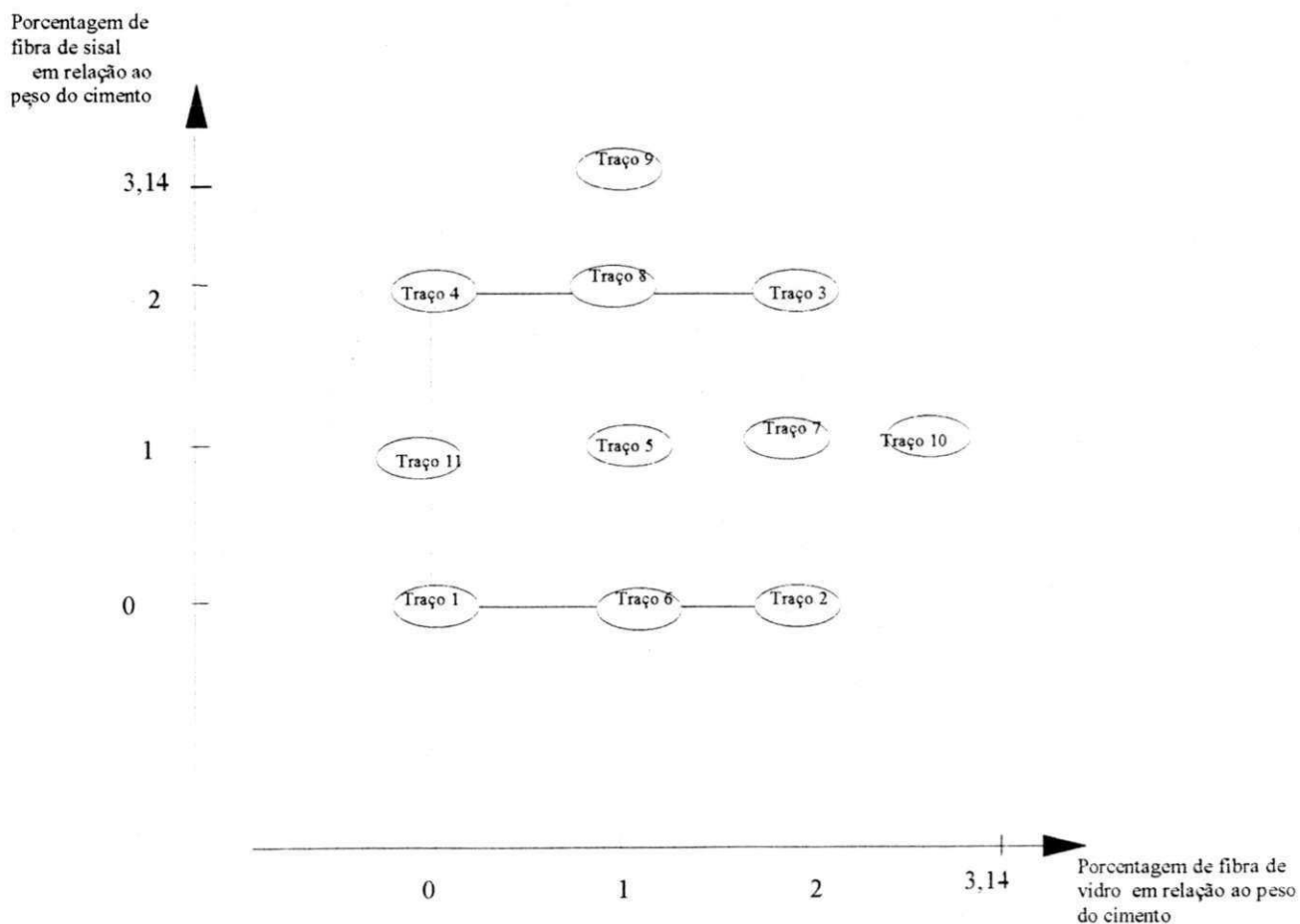


FIGURA 3.3: Desenho fatorial estabelecido para se avaliar a influência dos arranjos de fibra de sisal e vidro na resistência do compósito

Os ensaios de resistência à compressão, como também os de tração indireta, foram realizados em corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, numa prensa hidráulica de 50 t da LOSENHOUSI'V, a uma taxa de carregamento de 0,08 MPa/segundo. Seguiu-se as recomendações da norma brasileira NBR – 7215 para compressão simples e NBR – 7222 para tração indireta.

Os ensaios de flexão foram executados numa prensa MTS de 10t, a uma velocidade de deslocamento do travessão de 0,16 mm/min. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 3.4. Estabeleceu-se um vão entre apoios de 275 mm, seguindo-se as recomendações do Comitê Técnico No. 49 do RILEM (1984). As curvas carga x deflexão foram registradas em um “ploter” X-Y-T e posteriormente digitalizadas utilizando-se o software Digitalize-Pro. As curvas digitalizadas foram transferidas para planilha eletrônica Excel e analisadas.

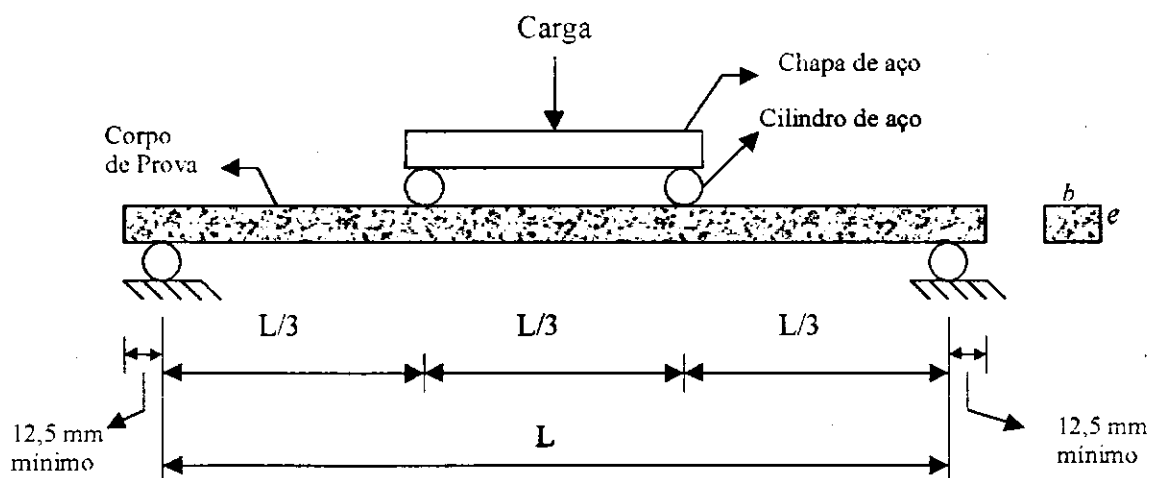


FIGURA 3.4: Esquema do ensaio de resistência à flexão em quatro pontos

Os ensaios de flexão nos compósitos, foram conduzidos até uma deflexão no meio do vão de aproximadamente 4 mm, com o objetivo de se determinar os parâmetros de tenacidade dos mesmos. A Figura 3.5 mostra um corpo de prova sendo ensaiado na prensa MTS.

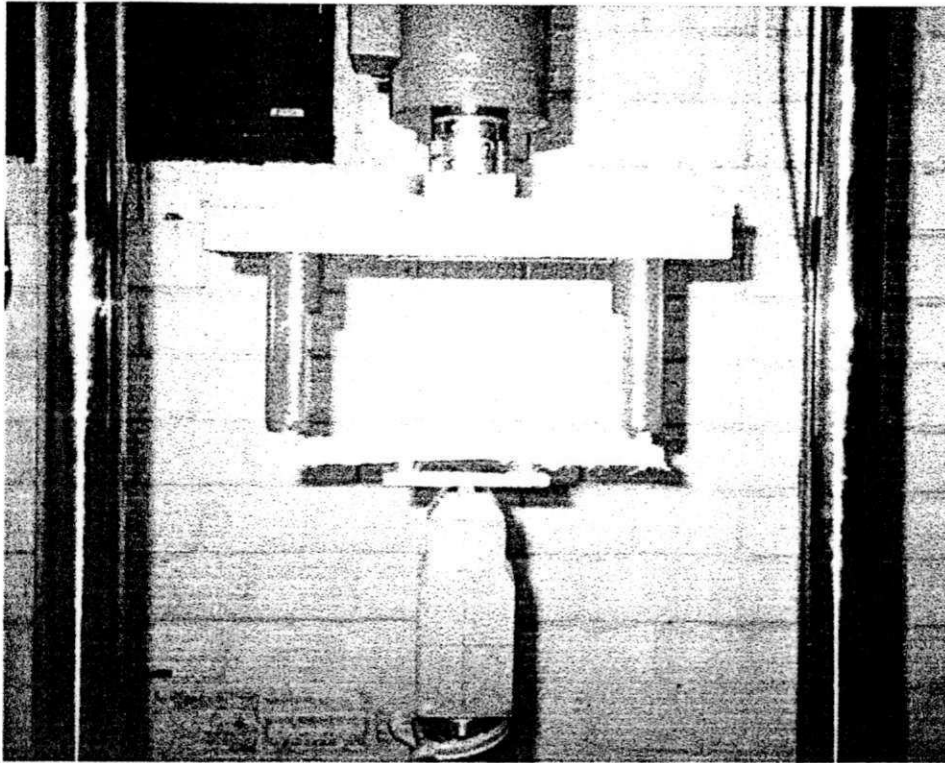


FIGURA 3.5 - Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de flexão na MTS

3.2.3 – Parâmetros utilizados para se avaliar o desempenho dos compósitos

Para se avaliar o desempenho dos compósitos, utilizou-se os resultados dos ensaios de flexão em quatro pontos. Os ensaios foram realizados a uma baixa velocidade do travessão e conduzidos até uma deflexão de 4mm. A partir das curvas carga x deflexão obtidas, calculou-se dois parâmetros para a avaliação da eficiência do reforço e do seu desempenho.

- Módulo de ruptura na flexão do material (MOR)
- Índices de tenacidade (FT e T_{JCI}) da norma japonesa JCI – JCSCE SF – 4 (JCI SF4 1983).

O módulo de ruptura(MOR) é dado pela equação:

$$MOR = 6M \setminus be^2 \quad (3.1)$$

Onde:

M – momento fletor máximo

b – largura do corpo de prova

e – espessura do corpo de prova

O índice da norma japonesa, T_{JCI} , é definido em termos absolutos como a energia necessária para se fletir uma viga de concreto reforçada com fibra até uma deflexão no centro do corpo de prova de $L \setminus 150$ do seu vão. Calculou – se também o T_{JCI} , com 4mm de deflexão. Em acréscimo ao valor da tenacidade absoluta, um fator de tenacidade na flexão (FT) é definido como:

$$FT = (T_{JCI} \times L) \setminus (\delta_{150} \times b \times e^2) \quad (3.2)$$

Onde:

L = comprimento do vão (distância entre os apoios)

b = largura da espécime

e = espessura do corpo de prova

δ_{150} = deflexão no meio do vão de $L \setminus 150$, no nosso caso $\delta_{150} = 1,83\text{mm}$, também com 4mm.

4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados. Convém lembrar que o traço da matriz foi 1:1,5:0,5 e a porcentagem de fibras se refere ao peso do cimento. Os resultados apresentados nos desenhos fatoriais podem ser combinados de três maneiras diferentes para se verificar a influência do fator X_1 (% de fibras de sisal); do fator X_2 (% de fibras de vidro) e da interação $X_1 \times X_2$ nas propriedades das misturas.

No nível mais alto de X_1 , existem três observações de cada propriedade avaliada, tal como no nível mais baixo. A média das diferenças entre elas é uma estimativa do *efeito principal* do fator X_1 . Da mesma maneira, o *efeito principal* do fator X_2 pode ser estimado. Uma estimativa da interação entre os fatores X_1 e X_2 é dada pela diferença entre a metade do efeito principal de X_2 no nível alto de X_1 , e a metade do efeito principal de X_2 no nível baixo de X_1 .

4.1 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

4.1.1 – Determinação dos efeitos principais

A Figura 4.1 apresenta os valores médios da resistência à compressão (em MPa) e do coeficiente de variação (em %) para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro. A resistência à compressão da matriz foi de 25,38 MPa com um coeficiente de variação de 2,12%.

Os resultados apresentados indicam que ao se aumentar a porcentagem de fibras de sisal de 0% para 2%, ocorre um decréscimo na resistência à compressão de 10,06 MPa. Esse decréscimo foi maior no caso onde a fibra de sisal se encontra sozinha, ou seja, no nível baixo de X_2 , onde não existia a presença da fibra de vidro. Essa foi a estimativa do *efeito principal* do fator X_1 .

Da mesma maneira, o *efeito principal* do fator X_2 pode ser estimado. Dos resultados obtidos nota-se que, se aumentarmos a porcentagem de fibras curtas de vidro de 0% para 2%, ocorre um discreto aumento da resistência à compressão de 0,32 MPa. Esse aumento da resistência é maior quando se tem na mistura a presença de 2% de fibras de sisal, ou seja, no nível alto de X_1 .

Uma estimativa do *efeito principal* da interação entre os dois fatores indica um aumento de 1,87 MPa na resistência à compressão dos compósitos.

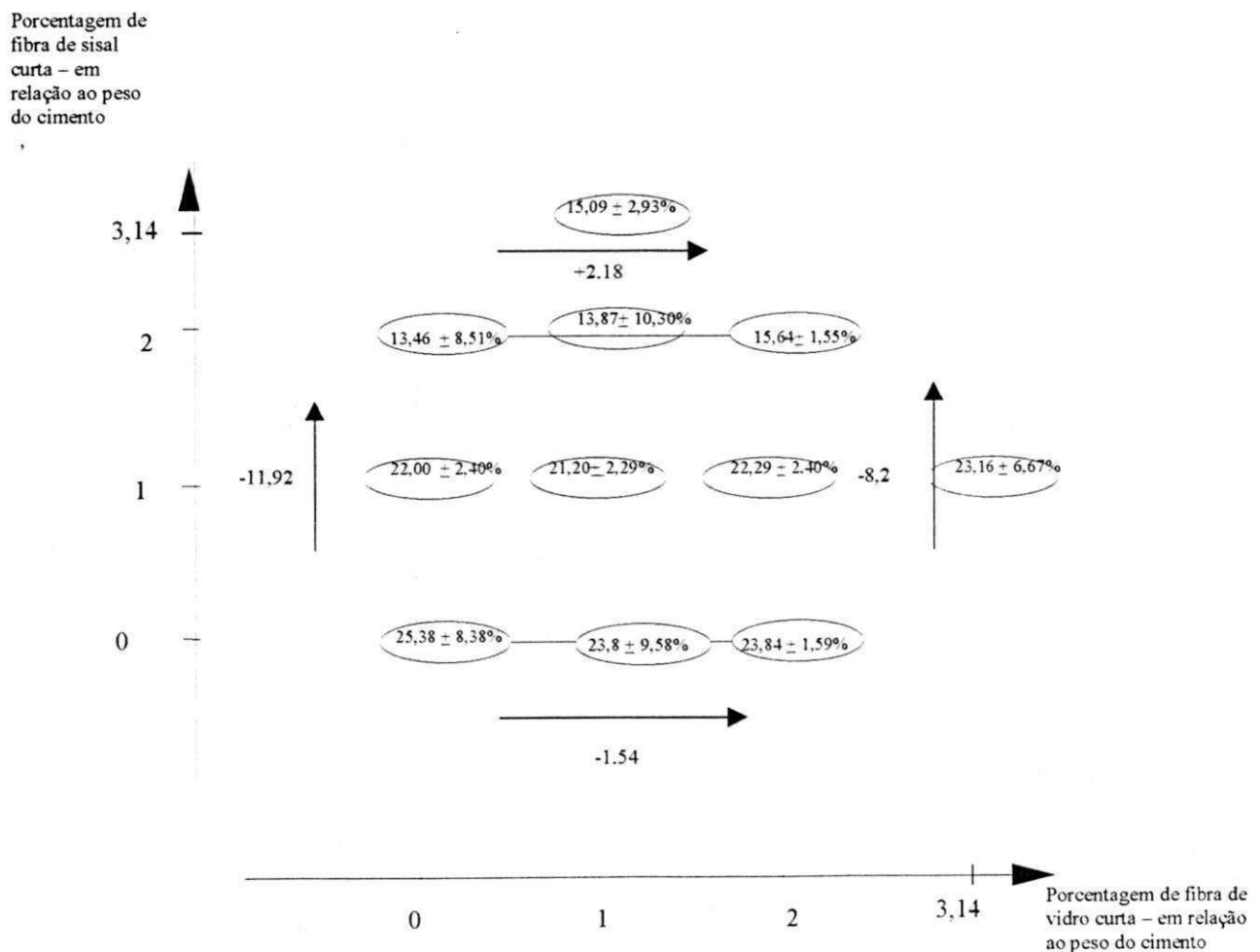


FIGURA 4.1– Resistência à compressão dos compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

4.1.2 – Análise de variância

Uma análise de variância foi feita para determinar se os efeitos principais e a interação entre eles eram significativos. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos

TABELA 4.1– Análise de variância dos resultados obtidos no ensaio de compressão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						F _{0,05-1,8}	F _{0,025-1,8}	F _{0,01-1,8}
Sisal	- 10,06	304,0	1	304,0	400	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,32	0,3072	1	0,3072	0,404	5,32	7,57	11,26
Interação	1,87	10,45	1	10,45	13,75	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		6,063	8	0,76				
Total		320,82	11					

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.1, observa-se que ao se adicionar no compósito fibras curtas de sisal ocorreu um decréscimo significativo na resistência à compressão do material, para os três níveis de confiança testados. Com relação à fibra de vidro, os resultados obtidos não tiveram significância, ou seja, o aumento de 0,32 MPa produzido na resistência do compósito, não foi estatisticamente significativo. Quando se testou o compósito híbrido, o aumento de 1,87 MPa na resistência à compressão foi significativo para os três níveis de confiança testados.

4.1.3 – Comportamento tensão x deformação

A Figura 4.2 mostra as curvas tensão – deformação típicas dos ensaios de compressão para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro. As demais curvas estão apresentadas no anexo 1. A Tabela 4.2 sumariza os resultados das resistências à compressão para o desenho fatorial utilizado, incluindo teores de 3,14% de fibras curtas de vidro associadas a 1% de fibras curtas de sisal e 3,14% de fibras curtas de sisal com 1% de fibras curtas de vidro.

Observando-se a Figura 4.2, nota-se que a matriz possui um comportamento bem linear até proximidades da carga máxima. A resistência média dos ensaios, como foi citado anteriormente, chegou a 25,38 MPa. Quando foi incorporado à matriz 1% de fibras curtas de sisal, nota-se que o material tornou-se mais deformável e que uma redução de 13,3% ocorreu na sua resistência à compressão. A ductilidade do material, no entanto, foi aumentada como se pode observar do seu comportamento pós-pico.

Ao se aumentar para 2% o teor de fibras curtas de sisal, constata-se uma redução ainda maior no valor da resistência à compressão da matriz (cerca de 47%) e da sua rigidez. Isto pode se justificar pela baixa trabalhabilidade observada para esse volume de fibra. Os equipamentos disponíveis não permitiram uma boa dispersão das fibras e sabe-se que isso pode resultar numa alta porosidade da mistura, afetando adversamente sua resistência [Tolêdo Filho, 1997].

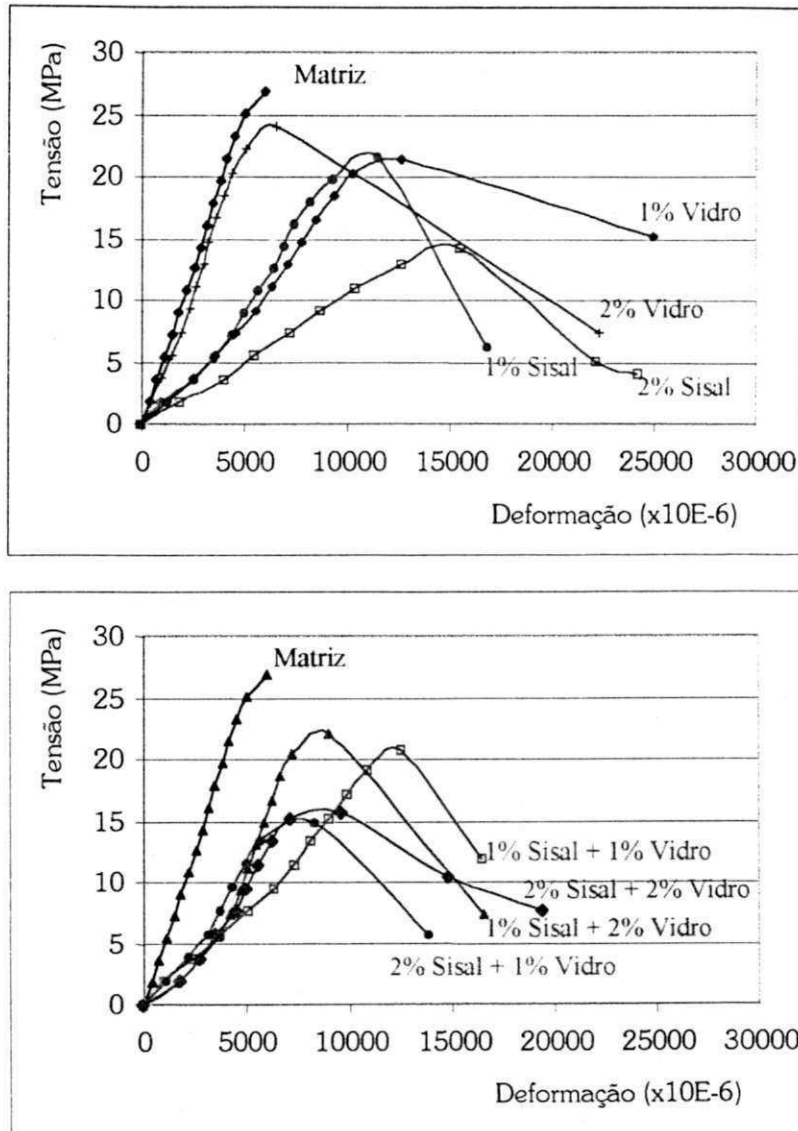


FIGURA 4.2 – Curvas tensão – deformação típicas obtidas dos ensaios de resistência à compressão realizados nos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

TABELA 4.2 – Resistência média à compressão da matriz e dos compósitos formados por fibras curtas de sisal e fibras curtas de vidro.

Nº	Mistura	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação(%)
01	Matriz	25,38	2,12	8,38
02	1% Sisal	22,00	0,53	2,40
03	2% Sisal	13,46	1,14	8,51
04	1% Vidro	23,80	2,22	9,58
05	2% Vidro	23,84	0,38	1,59
06	1% Sisal + 1% Vidro	21,20	0,49	2,29
07	1% Sisal + 2% Vidro	22,30	0,53	2,40
08	2% Sisal + 1% Vidro	13,87	1,51	10,30
09	2% Sisal + 2% Vidro	15,64	0,24	1,55
10	3,14% Sisal + 1% Vidro	15,09	0,44	2,93
11	1% Sisal + 3,14% Vidro	23,16	1,55	6,67

Os compósitos reforçados com 1% e 2% de fibras curtas de vidro apresentaram uma resistência à compressão comparável à da matriz e isso se justifica pelo fato de se ter obtido uma melhor dispersão desse tipo de fibra (que não absorve água de amassamento) e pelo fato de as mesmas serem mais rígidas que às fibras de sisal. Um comportamento mais dúctil pró-ruptura foi também observado

Com relação aos compósitos híbridos, observa-se que a presença de 2% de reforço (1% de fibras curtas de sisal + 1% de fibras curtas de vidro) reduziu a resistência da matriz em cerca de 16,5%, que é um comportamento semelhante ao observado quando se usou apenas com 1% de fibras curtas de sisal. Notou-se ainda que a inclinação do ramo descendente da curva tensão-deformação tornou-se discretamente mais suave, devido a presença da fibra de vidro.

Quando aumentou-se a quantidade de fibras curtas de vidro para 2%, mantendo-se 1% de fibras curtas de sisal, o comportamento em relação ao compósito híbrido anterior foi modificado. A resistência foi ligeiramente aumentada, em 5%, pela presença da fibra de vidro. Houve também um aumento da rigidez devido ao alto teor de fibras de vidro. O comportamento pós-pico foi mantido semelhante ao compósito com 1% fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro. Em relação à matriz, houve uma queda na resistência, em torno de 12%, mas um aumento da ductilidade, ou seja, na capacidade de carga pós-pico.

Outro compósito híbrido ensaiado foi reforçado com 1% de fibras curtas de vidro e 2% de fibras curtas de sisal. Em se comparando com o compósito com apenas 2% de fibras curtas de sisal, o teor de fibras curtas de vidro não conseguiu aumentar a

resistência; ocorrendo apenas um pequeno aumento da rigidez devido a presença das fibras de vidro. Quando se faz a comparação com o compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro, houve uma queda da resistência de 34% devido ao aumento do teor de fibras curtas de sisal, como era de se esperar.

Quando se usou 2% de fibras curtas de sisal associadas a 2% de fibras curtas de vidro, em relação ao compósito híbrido anterior (2% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro) a resistência à compressão e o módulo de elasticidade foram discretamente aumentos devido ao maior teor da fibra de vidro.

A presença de 3,14% de fibra de vidro + 1% de fibra de sisal resultou num compósito com resistência à compressão comparável à das misturas reforçadas com 1 e 2% de fibra de vidro. Já a presença de 3,14% de sisal + 1% de fibra de vidro conduziu a um compósito com resistência à compressão equivalente ao compósito reforçado com 2% de cada tipo de fibra.

A limitação do equipamento (máquina hidráulica) e da instrumentação utilizada não permitiu uma determinação mais precisa do módulo de elasticidade e do comportamento pós-fissuração dos compósitos estudados.

4.2 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

4.2.1 – Determinação dos efeitos principais e análise de variância

A Figura 4.3 apresenta os valores médios da resistência à tração indireta e o coeficiente de variação (em %) para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro. Os resultados apresentados e a análise de variância da Tabela 4.3, cujos efeitos e interação foram testados a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F, indicam que não existiu variação significativa no valor da resistência à tração indireta ao se incorporar fibras de sisal, vidro ou ambas à matriz.

A Tabela 4.4 e a Figura 4.4 resumizam os resultados obtidos. Observa-se que a adição de fibras curtas de sisal e vidro levaram a um discreto aumento na resistência à tração indireta do compósito, não considerado estatisticamente significativo. Por exemplo, quando foi incorporado à matriz 1% de fibras curtas de sisal nota-se um aumento na resistência de 8,26%. Ao se aumentar para 2% o teor de fibras, a resistência à tração, em relação ao compósito anterior diminuiu um pouco, embora, em relação à matriz, ainda

tenha aumentado em 7,11%. Quando na matriz se tem incorporado 1% de fibras curtas de vidro, em relação a matriz houve um aumento na resistência de 14,1%. Aumentando-se o teor de fibra para 2%, nota-se uma queda na resistência do compósito em relação ao anterior, de 10,5%. Mesmo assim, ainda houve um leve aumento da resistência do compósito em relação à matriz de 3%. Observe que os maiores incrementos na resistência foram obtidos para o teor de fibras de sisal ou vidro de 1% e que uma redução ocorreu para os teores de 2% de reforço, o que pode ser atribuído à maior quantidade de fibras na mistura, dificultando a dispersão das mesmas, conseqüentemente, sua trabalhabilidade e resistência.

Porcentagem de fibra de sisal curta – em relação ao peso do cimento

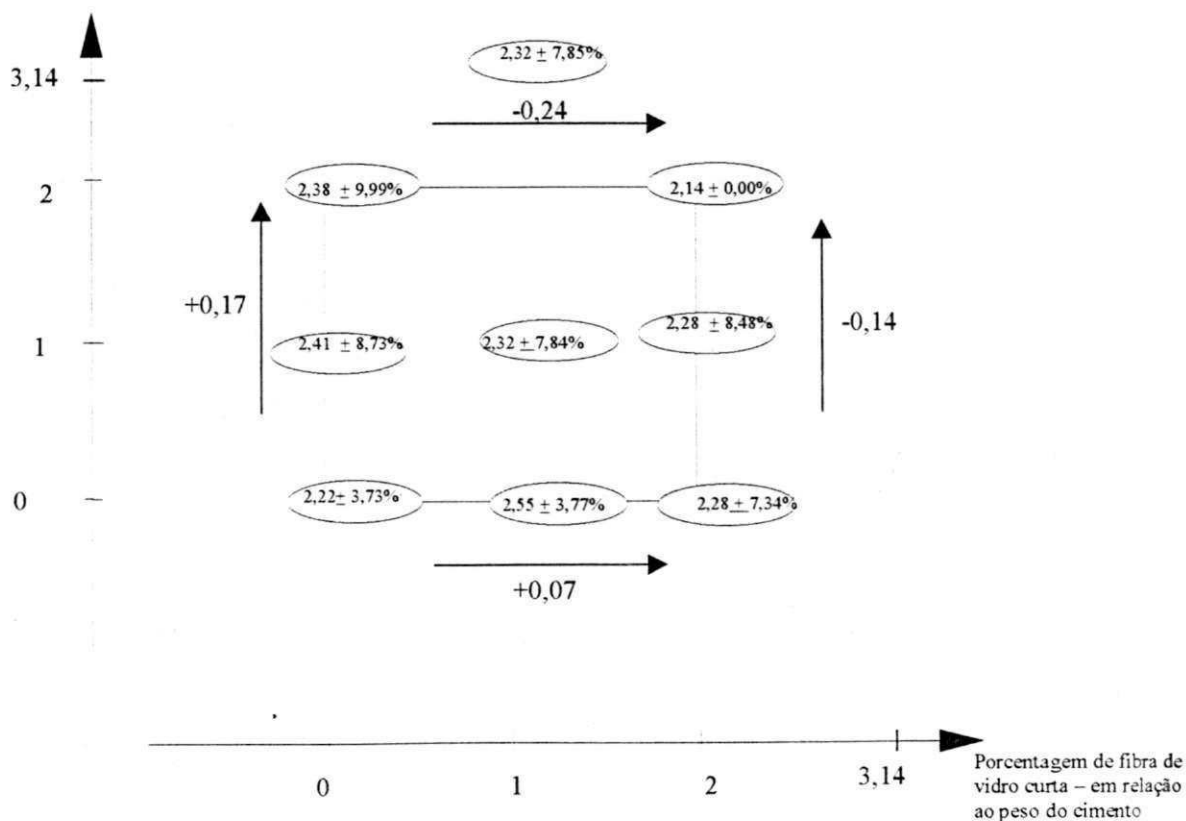


FIGURA 4.3 - Resistência à tração dos compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

Tal como em compressão, foram feitos também, ensaios em compósitos híbridos. Ao se ensaiar os compósitos em tração indireta, notou-se que não houve muita mudança na resistência à tração, uma vez que, ou o resultado se mantinha quase o mesmo

da matriz, ou ocorriam leves diferenças nos seus valores. Essas diferenças variaram de 4,3% (1% fibras curtas de sisal + 1% de fibras curtas de vidro) a -3,2% (2% de fibras curtas de sisal + 2% de fibras curtas de vidro).

Um benefício observado no comportamento de todas as misturas foi a mudança no modo de ruptura da matriz. Com a presença da fibra, os corpos de prova não eram simplesmente quebrados em duas partes como observado na matriz. As fibras que cortavam o plano de ruptura mantiveram o corpo de prova unido aumentando a sua capacidade de absorver energia.

TABELA 4.3 – Análise de variância dos resultados obtidos no ensaio de tração indireta dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						F _{0,05-1,8}	F _{0,025-1,8}	F _{0,01-1,8}
Sisal	- 0,08	0,020	1	0,020	0,893	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,0183	0,0010	1	0,0010	0,045	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,152	0,07	1	0,07	3,125	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,179	8	0,0224				
Total		0,27	11					

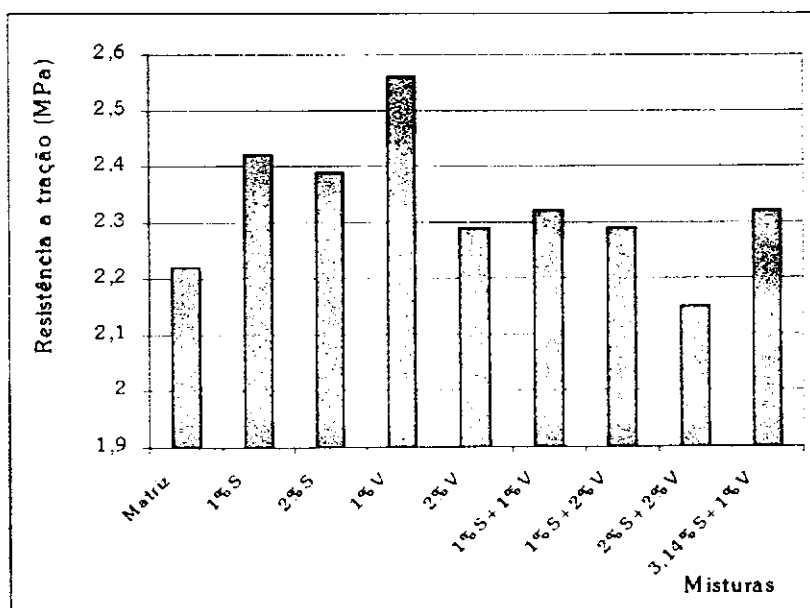


FIGURA 4.4 – Gráfico comparativo da resistência a tração indireta das misturas feitas com fibras curtas de sisal e de vidro.

TABELA 4.4 – Resistência média à tração indireta, da matriz e dos compósitos formados por fibra curta de sisal e fibra curta de vidro.

Nº	Mistura	Resistência (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de variação(%)
01	Matriz	2,22	0,08	3,73
02	1% Sisal	2,42	0,21	8,73
03	2% Sisal	2,39	0,24	9,99
04	1% Vidro	2,56	0,09	3,77
05	2% Vidro	2,29	0,16	7,34
06	1% Sisal + 1% Vidro	2,32	0,18	7,84
07	1% Sisal + 2% Vidro	2,29	0,19	8,48
08	2% Sisal + 2% Vidro	2,15	-	-
09	3,14% Sisal + 1% Vidro	2,32	0,19	7,85

4.3 – ENSAIO DE FLEXÃO

4.3.1 – Influência do tipo e arranjo das fibras

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram as curvas típicas carga x deflexão para os compósitos formados por apenas um tipo de fibra, seja curta ou longa de sisal ou vidro, variando-se as suas frações volumétricas. As demais curvas estão apresentadas no anexo II.

Na Figura 4.5 a curva do ensaio de resistência à flexão da matriz está em azul escuro. Ela é linear até a ruptura apresentando uma carga de primeira fissura em torno de 0,20 KN. O comportamento do compósito com 2% de fibras curtas de sisal possui enorme diferença em relação à matriz no que se refere ao comportamento pós-fissuração, pois a mesma apresenta grande capacidade de absorver energia, além de a carga de primeira fissura ter sido aumentada em cerca de 30%.

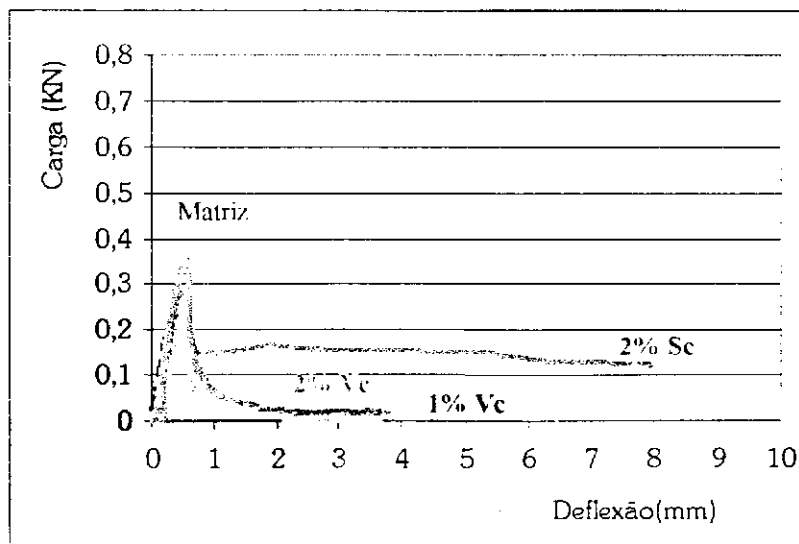


FIGURA 4.5 – Curvas típicas carga – deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal ou vidro

Quando se adiciona 1% e 2% de fibras curtas de vidro, percebe-se que, em relação à matriz, o compósito apresenta, após a fissuração, um gradativo decréscimo de carga, não possuindo a mesma ductilidade observada para os compósitos reforçados com fibras de sisal. A carga de fissuração foi incrementada em cerca de 8% e 50% devido a adição de, respectivamente, 1% e 2% de fibras curtas de vidro. O aumento da carga de

fissuração é justificado pelo fato de as fibras de vidro possuírem alto módulo de elasticidade.

Na Figura 4.6 apresenta-se as curva típicas obtidas dos ensaios dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal ou vidro. Comparando-se as curvas reforçadas com 1% e 2% de fibras longas de sisal, não se nota diferença significativa entre elas. Uma redução na carga logo após a fissuração da matriz é observada e isso se dá porque a fibra de sisal tem rigidez inferior à da matriz. Em seguida, ocorre uma elevação da carga que se mantém constante para deflexões no meio do vão de até 8mm quando o ensaio foi encerrado. Comportamento similar foi observado por Toledo Filho (1997 b).

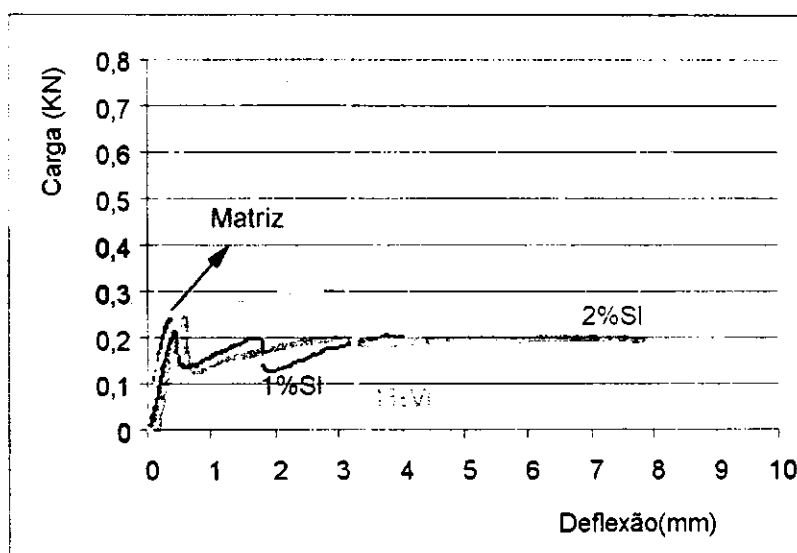


FIGURA 4.6 – Curvas típicas carga – deflexão do ensaio de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal ou de vidro

Para os compósitos reforçados apenas com fibras longas de vidro, nota-se uma mudança substancial na forma da curva carga-deflexão. Como o módulo de elasticidade das fibras é superior ao da matriz, elas absorverem o carregamento logo após a fissuração da matriz, sem que ocorra uma redução de carga nesse instante. Para o teor de reforço de 2%, ocorreu uma elevação substancial (superior a 200%) da carga de primeira fissura bem como da máxima carga pós-fissuração. É importante notar que a elevação dessa carga se deu, para ambas as frações de fibra de vidro, até uma deflexão de cerca de 3mm. A partir daí ocorreu uma queda brusca da capacidade de suporte do compósito, que pode ser atribuída a uma ruptura das fibras. Observe que esse comportamento não ocorreu com as misturas reforçadas com fibras de sisal que continuam a atuar intensamente até

deflexões bastante superiores (8,0mm) devido a sua maior flexibilidade e menor aderência fibra-matriz.

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores do módulo de ruptura e os índices de tenacidade dos compósitos com fibras de sisal ou de vidro, como também da matriz, para que se possa quantificar a discussão anterior. Em relação ao módulo de ruptura (MOR), nota-se que as fibras longas promoveram um considerável acréscimo no seu valor. A matriz apresentou um módulo de ruptura do material de 4,50 MPa, com um coeficiente de variação de 4,61%. Quando adicionou-se 2% de fibras curtas de sisal à matriz, houve um aumento de 35,5% no MOR do compósito. Ao se misturar à matriz 2% de fibras curtas de vidro, o MOR passou a ser 45,5% maior que o da matriz.

Ao se usar 1% de fibras longas de sisal como reforço da matriz, o MOR passou a ser 9,3% maior que o da matriz. Aumentando-se a quantidade de fibras longas para 2%, ocorreu um aumento no MOR de 46,6%. As fibras longas de vidro nos teores de 1% e 2%, aumentaram o MOR da matriz em, respectivamente 44% e 200%. Observa-se, portanto, que a fibra de vidro é mais eficiente que a de sisal no que se refere à elevação da resistência do material. Isso já era esperado uma vez que esse tipo de fibra possui maior resistência, rigidez e aderência fibra-matriz.

Os índices de tenacidade T_{JCI} foram avaliados a 1,8mm e 4mm de deflexão. A 1,8mm de deflexão, o compósito com 2% de fibras curtas de sisal aumentou em 163,6% o valor do T_{JCI} em relação ao da matriz. Ao se usar 1% de fibras curtas de vidro, o T_{JCI} da matriz foi aumentado em 27%. Aumentou-se então a porcentagem de fibras curtas de vidro para 2%, e o T_{JCI} passou a ser 81,8% maior que o da matriz. Observa-se, agora, a melhor performance da fibra de sisal, de baixo módulo e menor aderência, na elevação da ductilidade dos compósitos

Para os compósitos com fibras longas de sisal ocorreram aumentos de tenacidade de, respectivamente, 154,5% e 163%, para os teores de 1 e 2% de fibras. Para os mesmos teores de fibras longas de vidro, os aumentos foram de 436% e 1245,5%, respectivamente. Note que tal comportamento deve-se ao aumento da resistência dos compósitos produzido por esse tipo de fibra. Para deflexões mais altas ocorre uma redução brusca na resistência e tenacidade dos compósitos reforçados com fibras de vidro, enquanto que os compósitos reforçados com fibras de sisal preservam grande parte da resistência inicial e alta tenacidade. Tal efeito será melhor observado no índice de tenacidade T_{JCI} avaliado a 4mm de deflexão e nos índices de relação entre carga pós-fissuração e carga de fissuração.

No que se refere a T_{JCI} avaliado a 4mm, observa-se que a matriz, bem como o compósito com 1% de fibras curtas de vidro, não alcançaram tal deformação. O compósito reforçado com 2% de fibras curtas de vidro alcançou o valor de 0,27 kN mas a carga nessa deflexão era praticamente nula. Quando se utilizou 2% de fibras curtas de sisal, o T_{JCI} atingiu 0,63 KNmm, um valor 133,3% maior, mostrando o maior benefício da fibra de sisal curta, mais flexível e de menor aderência, na ductilidade pós-fissuração.

Quando se usou como reforço da matriz a fibra longa de sisal, comparando-se com o compósito com fibras curtas de sisal, o T_{JCI} a 4mm aumentou em 21% para a porcentagem de 2%, demonstrando a melhor performance, na ductilidade, do reforço contínuo. Com fibras longas de vidro, comparando-se com fibras longas de sisal nas mesmas porcentagens, a fibra longa de vidro conseguiu fazer com que o T_{JCI} do compósito, a 4,0 mm de deflexão fosse 43,1% maior para a porcentagem de 1%, e 107,5% para a porcentagem de 2%. É importante ressaltar que para deflexões maiores que 4mm os compósitos reforçados com fibra de vidro rompem enquanto que os reforçados com fibra de sisal ainda apresentam considerável capacidade de suporte.

O fator de tenacidade (FT) apresentou um comportamento semelhante ao índice de tenacidade T_{JCI} . A matriz atingiu um FT de 1,32 MPa com um coeficiente de variação de 29,9%. Quando se adicionou 2% de fibras de sisal à matriz, houve um aumento do FT de 175%. No compósito com 1% de fibras curtas de vidro o aumento foi de 12,1%. Quando se aumentou o teor de fibras curtas de vidro para 2%, o FT subiu 89,4%.

Ao se usar fibras longas de sisal como reforço, o FT do compósito aumentou, respectivamente, 185,6% e 190% para as porcentagens de 1% e 2%. Para as mesmas porcentagens de fibras longas de vidro, os FT dos compósitos aumentaram 441,6% e 995,4%, respectivamente.

Na Figura 4.7 apresenta-se as relações P/P_f para vários níveis de deflexão. Nota-se que o compósito com 2% de fibras curtas de sisal consegue atingir a deflexão de 8mm, com cerca de 42% do valor da carga de primeira fissura. Após a primeira fissura da matriz ocorreu uma queda de aproximadamente 42% da carga, que voltou a subir, para só tornar a cair, em níveis de deflexões maiores que 2,8 mm. Com isso comprova-se a boa contribuição da fibra curta de sisal na pós-fissuração do compósito. Os compósitos com fibras curtas de vidro não oferecem contribuição significativa na pós-fissuração do material, observando-se uma queda gradativa de carga pós-fissuração, que não conseguem atingir deflexões maiores que 2,8-4,0mm.

TABELA 4.5 – Índices de tenacidade do ensaio de flexão dos compósitos com fibras de sisal ou de vidro.

MISTURA	MOR (MPa) – CV(%)	T _{JCI} (1,8mm) KN.mm – CV(%)	T _{JCI} (4mm) KN.mm – CV(%)	FT (MPa) – CV(%)
Matriz	4,50 – 4,61	0,11 – 28,60	-	1,32 – 29,90
2% Sisal curto	6,10 – 2,06	0,29 – 6,60	0,63 – 5,69	3,63 – 5,83
1% Vidro curto	4,87 – 25,2	0,14 – 1,27	-	1,72 – 4,81
2% Vidro curto	6,56 -	0,20 -	0,24 -	2,11 -
1% Sisal longo	4,92 – 7,98	0,28 – 20,94	0,65 – 21,61	3,77 – 28,14
2% Sisal longo	6,60 -	0,28 -	0,76 -	3,80 -
1% Vidro longo	6,48 – 8,37	0,59 – 5,73	0,93 – 26,70	7,15 – 5,65
2% Vidro longo	13,50 – 2,19	1,49 – 3,43	3,59 – 14,18	14,46 – 2,17

Nos compósitos reforçados com fibras longas de sisal, o comportamento pós-fissuração foi superior ao observado com fibras curtas de sisal. Na porcentagem de 1%, a queda da carga após a fissuração da matriz foi de cerca de 40%, ocorrendo, após isso, um aumento na carga. O ensaio só foi conduzido até a deflexão de 4mm, onde o compósito suportava aproximadamente 50% da carga de primeira fissura.

Quando se aumentou a porcentagem de fibras longas de sisal para 2%, a queda do valor da carga de fissuração foi também em torno de 40%, tornando a subir. O compósito suportou 80% da carga de ruptura com a deflexão de 4mm, chegando a atingir cerca de 85%, com a deflexão de 6mm, onde se parou o ensaio.

Já com os compósitos feitos com fibras longas de vidro, o comportamento pós-fissuração foi significativamente diferente. Após a fissuração da matriz as fibras atuaram não permitindo queda de carga, e sim, fazendo com que ocorresse um aumento da mesma para só então, depois de atingida uma certa deflexão, as fibras se romperem, ocorrendo uma queda brusca de carga. Com 1% de fibras longas de vidro, conseguiu-se um aumento de cerca de 15% da carga de ruptura, com uma deflexão de 3,0mm. Após isso, a carga começou a cair, chegando à deflexão de 4,0mm quase anulada. Quando se usou 2% de fibras longas de vidro, conseguiu-se um aumento em torno de 21% da carga de primeira fissura, com a deflexão de 3,0 mm, chegando à deflexão de 4,0mm, com a carga em declínio acentuado.

Através da interpretação dessa figura, nota-se a contribuição de cada fibra em questão, no comportamento pós-fissuração dos compósitos por elas formados. Nota-se a capacidade que a fibra de sisal tem de absorver energia e manter a carga por um bom

tempo, atingindo deflexões relativamente grandes. A fibra longa de sisal, além de conseguir manter a carga até grandes deflexões, permite uma elevação gradual no seu valor. Quanto à fibra de vidro, a curta não teve um comportamento significativo na pós fissuração, enquanto que a longa mostrou-se excelente para suportar e aumentar a capacidade de carga até uma dada deflexão devido a sua melhor aderência à matriz. A partir daí, ocorre uma queda brusca de carga.

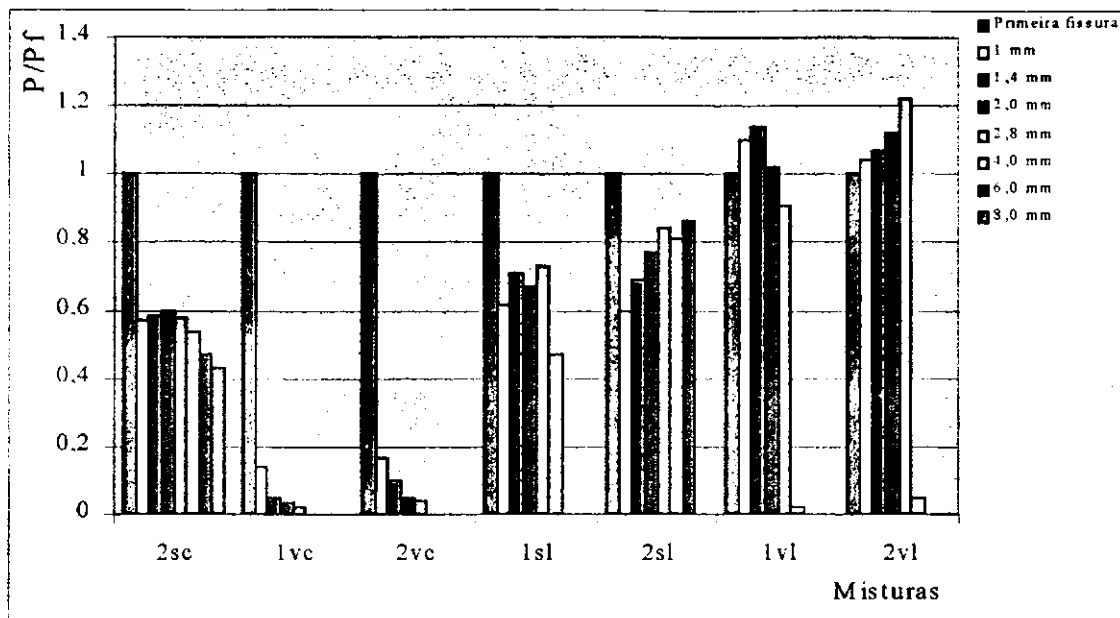


FIGURA 4.7 – Comportamento pós fissuração dos compósitos com fibras de sisal ou de vidro – Relação P/P_f (Carga à determinada deflexão/ Carga de primeira fissura).

4.3.2 – Compósitos híbridos

4.3.2.1– Compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro

A Figura 4.8 mostra as curvas carga – deflexão típicas para a matriz e para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro. Na Tabela 4.6 apresenta-se os valores do módulo de ruptura (MOR) dos índices de tenacidade (T_{JCI}), correspondentes à deflexão de 1,8mm (L\150) e 4mm e do fator de tenacidade (FT), obtidos para a matriz e compósitos.

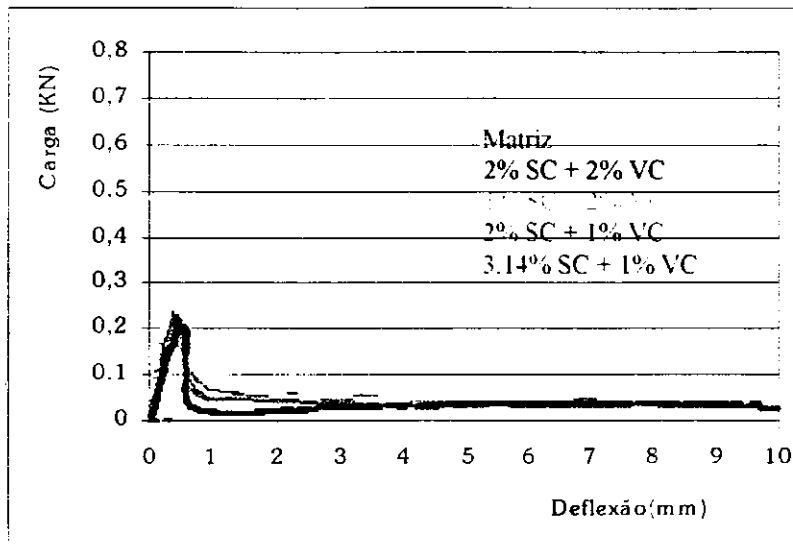


FIGURA 4.8 – Curvas carga – deflexão típicas dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

TABELA 4.6 – Módulo de ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade (FT) dos compósitos híbridos com fibras curtas de sisal e de vidro

MISTURA	MOR (MPa) - CV(%)	T_{JCI} (1.8mm) KN.mm - CV(%)	T_{JCI} (4mm) KN.mm - CV(%)	FT (MPa) - CV(%)
Matriz	4.50 - 4.61	0.11 - 28.60	-	1.32 - 29.90
2% Sisal curto	6.10 - 2.06	0.29 - 6.60	0.63 - 5.69	3.63 - 5.83
2% Vidro curto	6.56 -	0.20 -	0.24 -	2.11 -
2% Sisal curto e 2% Vidro curto	3.71 -	0.19 -	0.31 -	4.50 -
1% Sisal curto e 2% Vidro curto	5.01 - 14.27	0.20 - 19.97	0.29 - 20.54	2.18 - 16.54
2% Sisal curto e 1% Vidro curto	4.56 - 9.89	0.15 - 22.71	0.22 - 23.32	1.73 - 22.66
3.14% Sisal curto e 1% Vidro curto	4.20 - 3.01	0.12 - 20.92	1.42 - 20.28	0.19 - 12.36

4.3.2.1.1 Carga de primeira fissura (FCload)

4.3.2.1.1.1 Efeitos principais e análise de variância

A Figura 4.9 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura (em kN) e o coeficiente de variação (em %) para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro. A partir desses resultados serão calculadas a influência dos fatores X_1 (% de fibras curtas de sisal), X_2 (% de fibras curtas de vidro) e a interação entre eles, na carga de primeira fissura das misturas.

No caso do uso de fibras curtas de sisal e de vidro, aumentar a porcentagem de fibras de sisal de 0% para 2%, resultou num decréscimo da capacidade de carga de 0,02 kN; sendo, esse decréscimo, oriundo da redução observada no nível alto de X_2 , onde existe a presença da fibra de vidro. Com relação ao *efeito principal* do fator X_2 , nota-se que, se aumentarmos a porcentagem de fibras curtas de vidro de 0% para 2%, ocorre um aumento da capacidade de carga de 0,02 kN. Esse aumento é maior quando a fibra de vidro se encontra sozinha, ou seja, no nível baixo de X_1 .

Uma estimativa da interação entre os dois fatores indica um decréscimo de 0,09 KN. Uma análise de variância foi feita visando determinar se os efeitos principais e a interação entre eles eram significativos. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.7 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 4.7 – Análise de variância para a carga de primeira fissura (FCLOAD) do ensaio de flexão dos compósitos com fibras curtas de sisal e de vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 0,02	0,0012	1	0,0012	2,7	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,02	0,0012	1	0,0012	2,7	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,09	0,0225	1	0,0225	51,4	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,0035	8	0,00044				
Total		0,0284	11					

ADRIANO

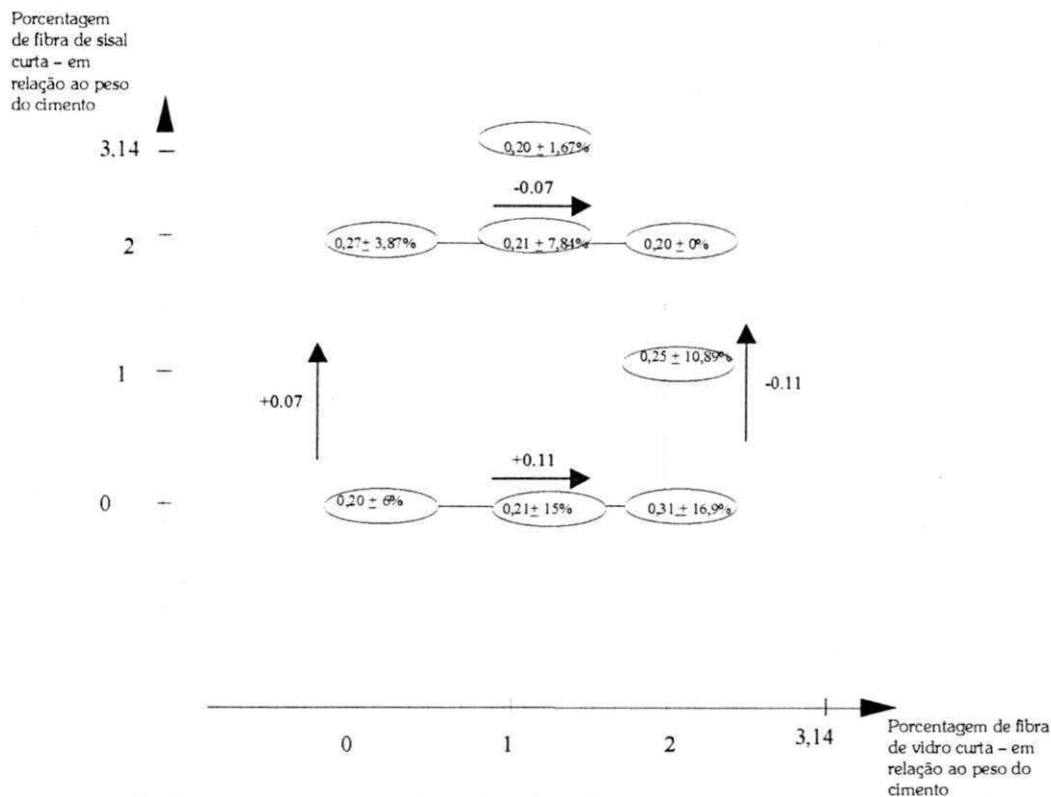


FIGURA 4.9 – Carga de primeira fissura para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.7, pode-se concluir que o efeito da adição de fibra de sisal é reduzir a carga de primeira fissura (ver valores no nível mais alto de X_2), enquanto que o da adição de fibra de vidro é aumentá-la. No entanto esses efeitos não são estatisticamente significativos quando comparados à interação entre eles. Isto é, a hibridização com fibras curtas não foi vantajosa no que se refere à FCLoad. Note que, mesmo assim, não observa-se redução na carga de primeira fissura da matriz.

4.3.2.1.1.2 Superfície de resposta

Com o objetivo de se obter um modelo para a previsão da carga de primeira fissura dos compósitos com fibras curtas de sisal e de vidro, uma equação de regressão linear múltipla foi estabelecida para o conjunto de observações. O modelo pode ser escrito como:

$$FCLOAD = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon, \quad (4.1)$$

sendo ε os erros aleatórios e β_0 , β_1 e β_2 os coeficientes de regressão.

Os coeficientes β_0 , β_1 e β_2 foram obtidos de um programa desenvolvido para tal, através do método dos mínimos quadrados.

É pouco provável que a equação 4.1, que descreve um plano no espaço das variáveis independentes $\{X_i\}$, seja uma aproximação razoável da superfície de resposta sobre todo o espaço dessas variáveis independentes, mas para a região em estudo, a maioria das vezes, pode-se considerar satisfatório.

Os coeficientes de regressão obtidos para o modelo matemático que descreve a carga de primeira fissura resultaram na seguinte equação para o FCload:

$$FCload = 0,25 - 0,01X_1 + 0,01X_2 \quad (4.2)$$

A Tabela 4.8 apresenta uma comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços estudados. Observe que o modelo resultante da análise fatorial levou a erros que variaram entre 6 e 25%. Considerando a simplicidade da equação utilizada, pode-se considerar como satisfatória a superfície de resposta obtida.

TABELA 4.8 – Valores teóricos e experimentais da FCload em flexão do compósito híbrido de fibras curtas de sisal e de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,20	0,25	+25,0
2% Sisal curto	0,27	0,23	-15,0
1% Vidro curto	0,21	0,26	+23,8
2% Vidro curto	0,31	0,33	+6,4
2% Sisal curto e 2% Vidro curto	0,20	0,25	+25,0
1% Sisal curto e 2% Vidro curto	0,25	0,26	+4,0
2% Sisal curto e 1% Vidro curto	0,21	0,24	+14,3

4.3.2.1.2 Módulo de ruptura (MOR)

4.3.2.1.2.1 Efeitos principais e análise de variância

Na Figura 4.10 apresenta-se os valores para o módulo de ruptura (MOR) do material. A partir desses dados estimou-se os efeitos principais. O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de curtas de sisal) foi estimado como um decréscimo de 0,16 MPa no MOR, sendo esse decréscimo resultante da redução observada no nível mais alto de X_2 , ou seja, quando já havia no compósito 2% de fibras curtas de vidro. Para o fator X_2 (fibras curtas de vidro), a estimativa foi de um aumento no MOR de 0,15 MPa, sendo maior esse aumento, para onde não existia fibras curtas de sisal. Em relação à interação entre os dois fatores, estima-se um decréscimo do MOR de 1,45 MPa.

Uma análise de variância foi realizada para determinar se os efeitos principais e a interação entre eles eram significativos. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos. Os resultados indicam que o efeito da adição individual das fibras curtas de sisal ou vidro não é significativo, mas que a interação o é. Note também que o MOR de todos os compósitos foi superior ao da matriz.

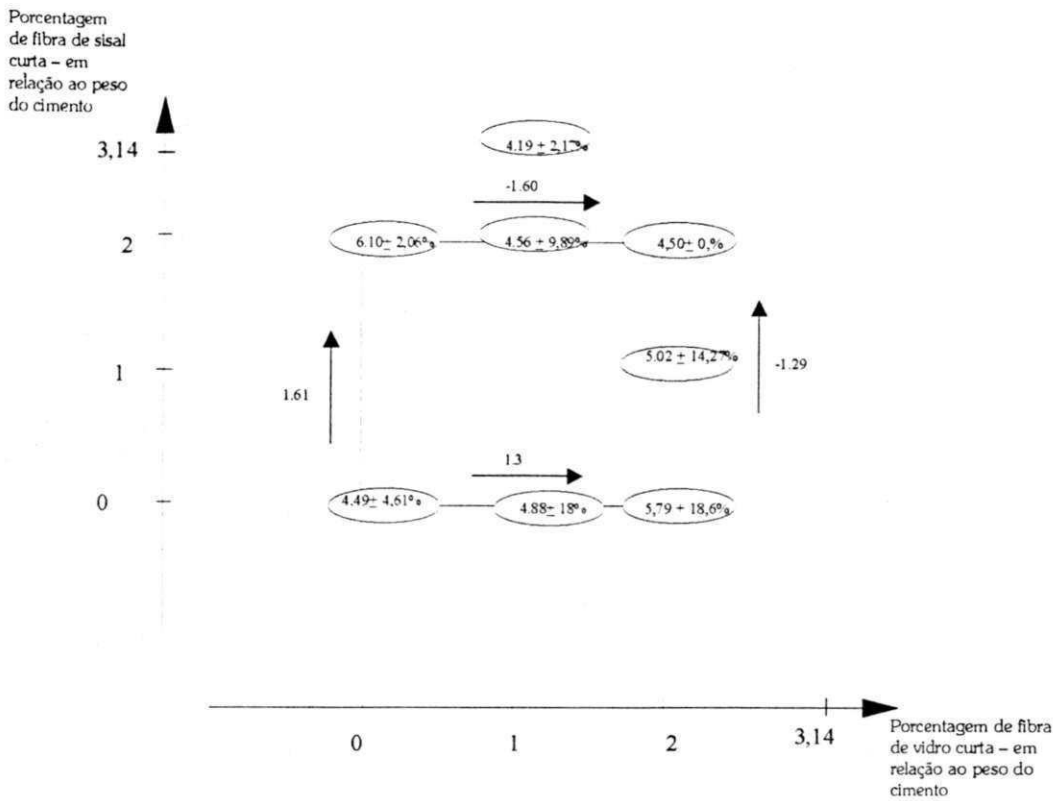


FIGURA 4.10 – Módulo de ruptura para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

TABELA 4.9 – Análise de variância para o MOR dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						F _{0,05-1,8}	F _{0,025-1,8}	F _{0,01-1,8}
Sisal	- 0,16	0,080	1	0,080	0,29	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,15	0,074	1	0,074	0,27	5,32	7,57	11,26
Interação	- 1,44	6,22	1	6,22	22,8	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		2,18	8	0,2725				
Total		8,56	11					

4.3.2.1.2.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores do MOR para os compósitos em questão é dado pela equação 4.2:

$$MOR = 5,42 - 0,12X_1 - 0,27X_2 \quad (4.2)$$

A Tabela 4.10 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços estudados. Os resultados indicam que a exceção da matriz, onde o erro atingiu 20%, os erros observados variaram de 3 a 12% e podem ser considerados aceitáveis.

TABELA 4.10 – Valores teóricos e experimentais do MOR dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	4,50	5,42	+20,4
2% Sisal curto	6,10	5,18	-12,0
1% Vidro curto	4,88	5,15	+5,53
2% Vidro curto	5,79	4,88	-8,44
2% Sisal curto e 2% Vidro curto	4,50	4,64	+3,11
1% Sisal curto e 2% Vidro curto	5,02	4,76	-5,5
2% Sisal curto e 1% Vidro curto	4,56	4,91	+7,7

4.3.2.1.3 Capacidade de absorver energia: índices de tenacidade T_{JCI} , FT e P/P_f

4.3.2.1.3.1 Efeitos principais e análise de variância no índice $T_{JCI, 1,8mm}$

Os resultados para T_{JCI} , avaliado a 1,8 mm, são apresentados na Figura 4.11. O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de curtas de sisal), foi aumentar o valor do T_{JCI} em 0,06 KN.mm, sendo maior esse aumento para o nível mais baixo de X_2 , ou seja, quando não havia no compósito de fibras curtas de vidro, só fibras curtas de sisal. Para o fator X_2 (fibras curtas de vidro), a estimativa foi um aumento do T_{JCI} de 0,02 KN.mm, sendo maior esse aumento, para onde não existia fibra curta de sisal, e sim, apenas fibra curta de vidro. Em relação à interação entre os dois fatores, obteve-se um decréscimo do T_{JCI} de 0,12 KN.mm.

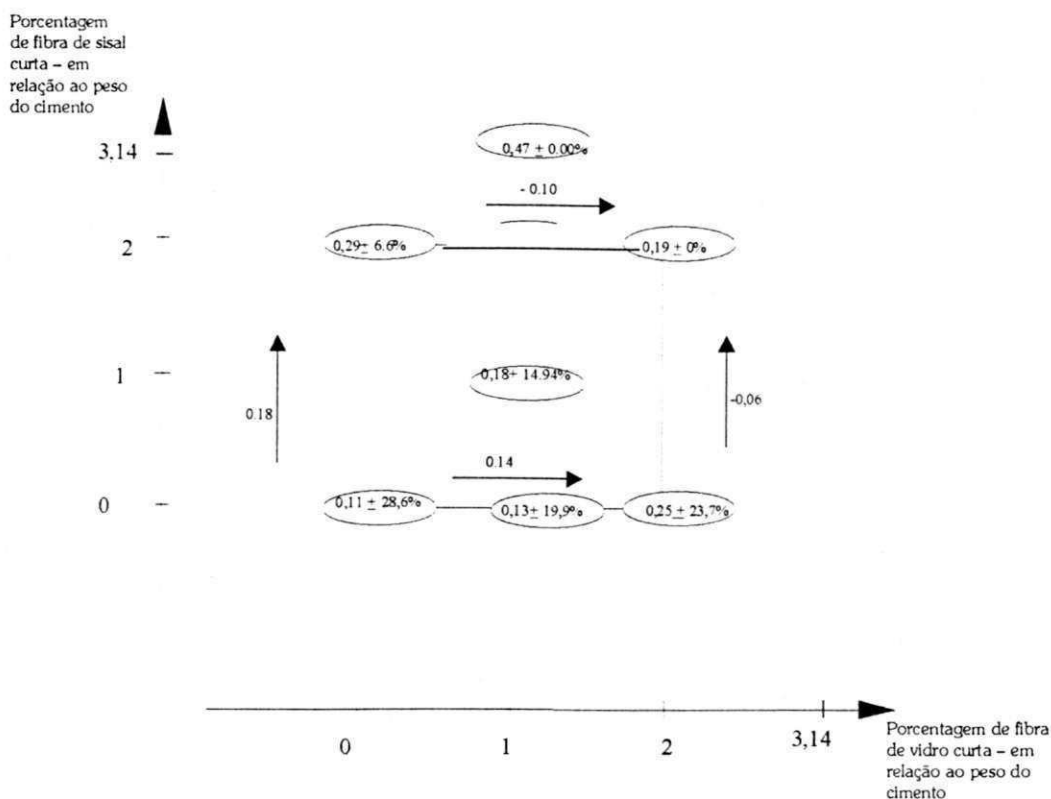


FIGURA 4.11 – Resultados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão obtidos para compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e vidro.

A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos. Com 99% de certeza, pode-se afirmar que a adição da fibra de sisal e a interação entre os dois efeitos são estatisticamente significativos.

TABELA 4.11 – Análise de variância para os valores de T_{JCI} a 1,8 mm, para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e de vidro.

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	0,06	0,01141	1	0,01141	16,04	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,02	0,0010	1	0,0010	1,406	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,12	0,042	1	0,042	59,05	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,0057	8	0,00071				
Total		0,0601	11					

4.3.2.1.3.2 Superfície de resposta

O modelo matemático obtido para $T_{JCI\ 1,8mm}$ é dado por:

$$T_{JCI\ 1,8mm} = 0,15 + 0,17X_1 - 0,01X_2 \quad (4.3)$$

A Tabela 4.12 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Os resultados indicam que o hiperplano ajustado aos dados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão não se ajustaram bem aos dados experimentais, pois erros de até 52% foram observados. Uma equação de ordem superior poderia, provavelmente, promover um melhor ajuste.

TABELA 4.12 – Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} a 1,8mm de deflexão para o compósito reforçado com fibras curtas de sisal e vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,11	0,15	+36,3
2% Sisal curto	0,29	0,49	+20,7
1% Vidro curto	0,13	0,14	+7,7%
2% Vidro curto	0,25	0,13	-24,0
2% Sisal curto e 2% Vidro curto	0,19	0,29	+52,6
3,14% Sisal curto e 1% Vidro curto	0,47	0,67	+42,5

4.3.2.1.3.3 $T_{JCI, 4,0mm}$, FT e P/P_f

Com relação ao índice de tenacidade do material a 4 mm de deflexão (T_{JCI} a 4 mm), observa-se o acréscimo na capacidade de absorver energia promovido pela presença da fibra de sisal. Os valores de FT confirmam a maior capacidade de absorver energia dos compósitos reforçados com 2% de fibras de sisal. Uma melhor observação desse mecanismo pode ser observado nos índices P/P_f mostrado na Figura 4.12.

Observa-se que a fibra curta de sisal, sozinha, consegue absorver bastante energia, permitindo grandes deflexões, mantendo cargas relativamente altas na pós-fissuração do compósito, enquanto que, a fibra curta de vidro não contribui significativamente para o comportamento pós-pico do material.

Quando se adicionou ao compósito reforçado com fibra de vidro, uma certa porcentagem de fibra de sisal, o comportamento pós-fissuração do material foi melhorado. Por exemplo, no compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro, após a fissuração, ocorreu uma queda da capacidade de carga de aproximadamente 50%, mas esse compósito ainda apresentou 30% da carga de primeira fissura a uma deflexão de 2,8mm. No geral pode-se dizer que todas as misturas híbridas apresentaram comportamento pós-fissuração melhor que as misturas reforçadas apenas com fibras de vidro.

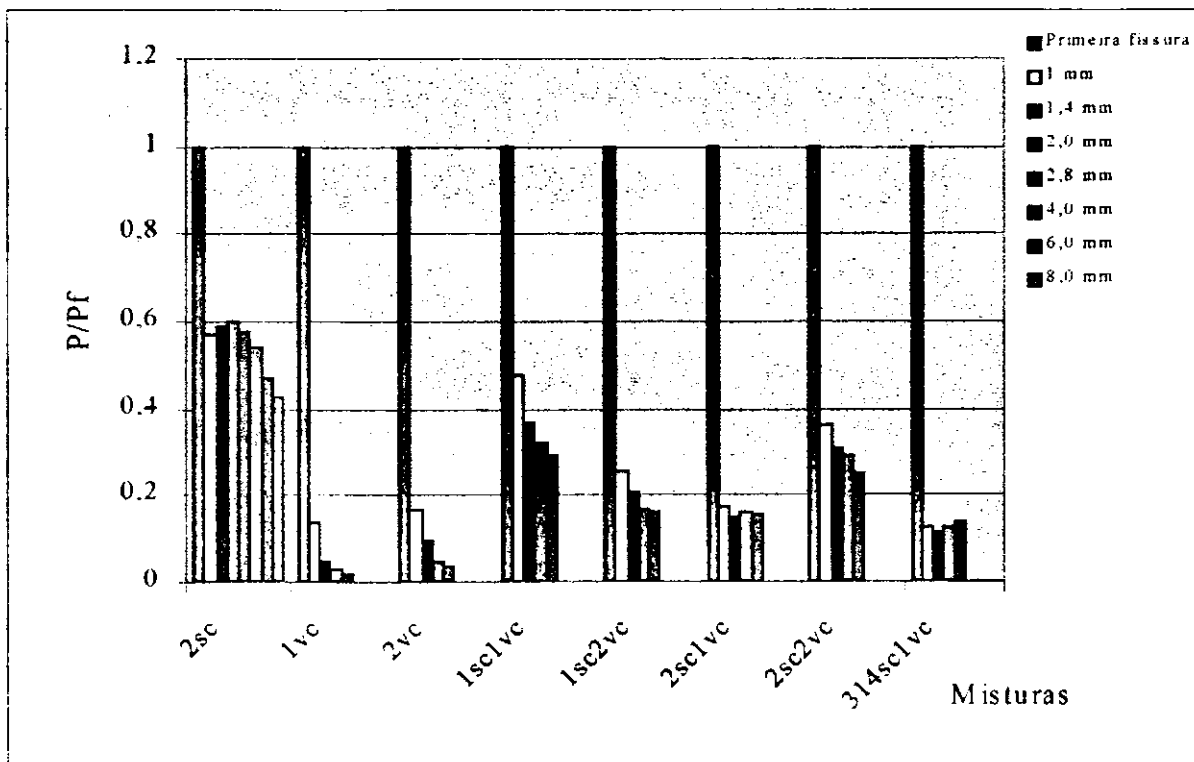


FIGURA – 4.12 – Comportamento pós fissuração do compósito reforçado com fibras curtas de sisal e de vidro – Relação P/P_f (Carga à determinada deflexão/ Carga de primeira fissura)

4.3.2.2 – Compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

A Figura 4.13 apresenta as curvas típicas carga – deflexão da matriz e dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro. Quando se adiciona 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras longas de vidro à matriz, nota-se apenas uma pequena mudança na forma da curva carga-deflexão obtida para o compósito reforçado com apenas 1% de fibras longas de vidro (Figura 4.6). Essa mudança é um aumento na capacidade de deformação da peça, provocado pela fibra de sisal.

Ao se aumentar o teor de fibras curtas de sisal e fibras longas de vidro de 1% para 2%, ocorre uma mudança mais expressiva na forma da curva carga-deflexão. Devido à presença das fibras de sisal, a redução na carga que ocorria abruptamente a uma deflexão de cerca de 3,0mm na mistura reforçada apenas com fibra longa de vidro passa a ocorrer a uma deflexão de 5,0 mm e deixa de ser abrupta. Outra diferença significativa é que, devido às fibras de vidro, não ocorre mais a redução na carga logo após a fissuração da peça como acontecia para o compósito reforçado apenas com fibras de sisal.

A curva carga – deflexão do compósito com 3,14% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras longas de vidro ainda apresenta um pequeno decréscimo na carga logo após a fissuração, mas é evidente que esse comportamento ainda é ditado pela fibra de vidro longa. Da mesma forma, a fibra de sisal curta controla a tenacidade da mistura, pois é bastante gradual o decréscimo de carga observado para esse compósito após a fissuração.

Na curva do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro, nota-se que as fibras curtas de sisal contribuem consideravelmente para que a peça suporte uma grande deformação sem romper e que as de vidro longo promovem um acréscimo da capacidade de carga, após a fissuração da matriz. Mais uma vez não foi observada a redução na carga imediatamente após a fissuração.

Os valores do módulo de ruptura (MOR) dos índices de tenacidade (T_{JCI}), correspondentes à deflexão de 1,8mm (L150) e 4mm e do fator de tenacidade (FT) são apresentados na Tabela 4.13.

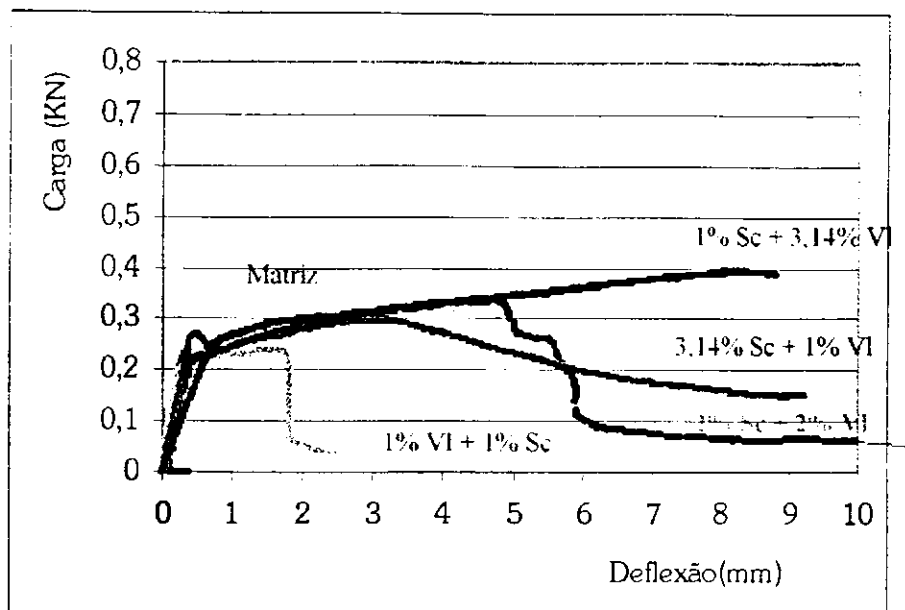


FIGURA 4.13 – Curvas típicas carga – deflexão da matriz e dos compósitos híbridos de fibras curtas de sisal e longas de vidro.

TABELA 4.13 – Módulo de Ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade (FT) dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

MISTURA	MOR (MPa) – CV(%)	T _{JCI} (1,8mm) KN.mm – CV(%)	T _{JCI} (4mm) KN.mm – CV(%)	FT (MPa) – CV(%)
Matriz	4,50 – 4,61	0,11 – 28,60	-	1,32 – 29,90
2% Sisal curto	6,10 – 2,06	0,29 – 6,60	0,63 – 5,69	3,63 – 5,83
1% Vidro longo	6,48 – 8,37	0,59 – 5,73	0,93 – 26,70	7,15 – 5,65
2% Vidro longo	13,50 – 2,19	1,49 – 3,43	3,59 – 14,18	14,46 – 2,17
1% Sisal curto e 1% Vidro longo	5,78 – 21,97	0,52 – 25,32	-	6,25 – 25,05
2% Sisal curto e 2% Vidro longo	6,38 – 12,98	0,50 – 39,38	1,78 – 12,05	5,70 – 38,10
1% Sisal curto e 3,14% Vidro longo	8,49 – 1,30	0,40 – 9,07	1,06 – 6,04	4,71 – 7,22
3,14% Sisal curto e 1% Vidro longo	6,11 – 8,42	0,39 – 13,07	0,95 – 16,15	4,64 – 11,87

4.3.2.2.1 Carga de primeira fissura (FCload)

4.3.2.2.1.1 Efeitos principais e análise de variância

Na Figura 4.14, apresentam-se os valores médios da carga de primeira fissura (em kN) e o coeficiente de variação (em %) para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro. Com esses resultados calcula-se a influência dos fatores X_1 (% de fibras curtas de sisal) e X_2 (% de fibras longas de vidro) e da interação entre eles, na carga de primeira fissura das misturas.

Usando-se fibras curtas de sisal e longas de vidro como reforço dos compósitos, aumentar a porcentagem de fibras de sisal de 0% para 2%, resultou num decréscimo da carga de primeira fissura de 0,16 kN; sendo que esse decréscimo ocorre devido à redução observado no nível mais alto de X_2 , onde existe a presença da fibra de vidro. Estimando-se o *efeito principal* do fator X_2 , nota-se que, se aumentarmos a porcentagem de fibras longas de vidro de 0% para 2%, ocorre um aumento da capacidade de carga, de 0,18 kN. Esse aumento é maior quando a fibra de vidro se encontra sozinha, ou seja, no nível baixo de X_1 . Uma estimativa do *efeito principal* da interação entre os dois fatores é de um decréscimo de 0,23 kN na carga de primeira fissura. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.14 apresenta os resultados obtidos. Com base nesses resultados, conclui-se que todos os fatores são significativos.

TABELA 4.14– Análise de variância para a carga de primeira fissura (FCload) obtida dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 0,16	0,080	1	0,080	504	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,18	0,10	1	0,10	400	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,23	0,1587	1	0,1587	793,5	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,0016	8	0,0002				
Total		0,3411	11					

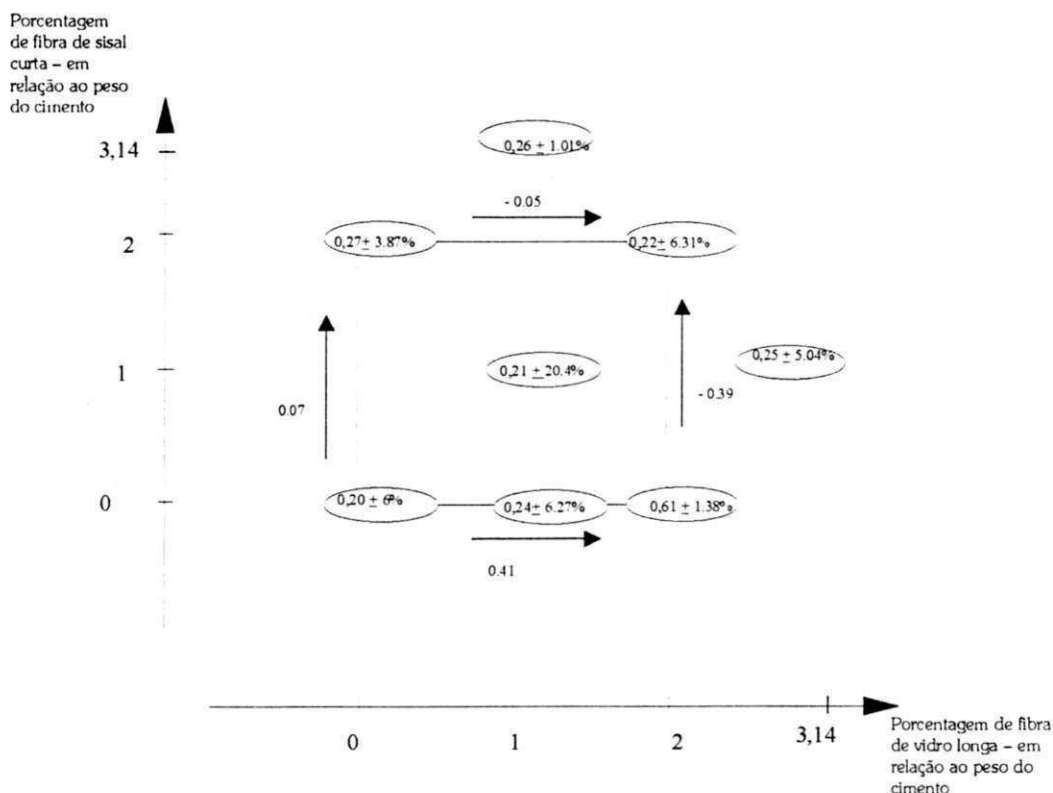


FIGURA 4.14– Carga de primeira fissura (FCload) obtida dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

4.3.2.2.1.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores da carga de primeira fissura para os compósitos em questão é dado pela equação 4.4:

$$FCLOAD = 0,25 - 0,04X_1 + 0,09X_2 \quad (4.4)$$

A Tabela 4.15 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Os erros observados atingiram 40%, mostrando que o modelo teórico não conseguiu prever satisfatoriamente a carga de primeira fissura.

TABELA 4.15 – Valores teóricos e experimentais da FClload para os compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,20	0,25	+25,0
2% Sisal curto	0,27	0,17	-37,0
1% Vidro longo	0,24	0,34	+41,6
2% Vidro longo	0,61	0,43	-29,5
1% Sisal curto e 1% Vidro longo	0,21	0,30	+36,4
2% Sisal curto e 2% Vidro longo	0,22	0,35	+40,0

4.3.2.2.2 Módulo de ruptura (MOR)

4.3.2.2.2.1 Efeitos principais e análise de variância

A Figura 4.15 apresenta o módulo de ruptura (MOR) dos compósitos. O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de curtas de sisal), foi um decréscimo do MOR de 2,76 MPa, sendo esse decréscimo observado apenas para o nível mais alto de X_2 , ou seja, quando já havia no compósito 2% de fibras curtas de vidro.

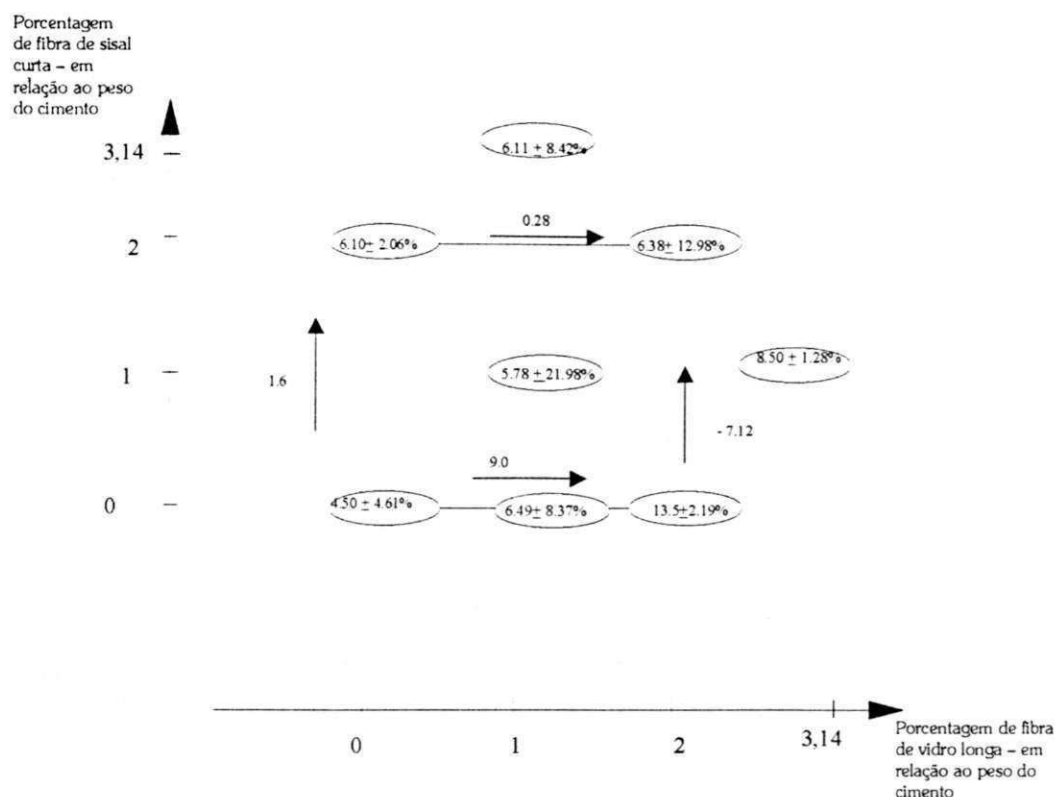


FIGURA 4.15 – Resultados do MOR dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

Para o fator X_2 (fibras longas de vidro), a estimativa foi de um acréscimo do MOR de 4,64 MPa, sendo maior esse acréscimo, quando não existia fibras curtas de sisal. Em relação à interação entre os dois fatores, estima-se um decréscimo do MOR de 4,36 MPa. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.16 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 4.16– Análise de variância para os resultados do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 2,76	22,8	1	22,8	100,96	5,32	7,57	11,26
Vidro	4,64	64,6	1	64,6	286,04	5,32	7,57	11,26
Interação	- 4,36	57,2	1	57,2	253,33	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		1,81	8	0,2258				
Total		146,4	11					

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.16, concluiu-se que a adição de fibras longas de vidro significativamente aumentam o MOR do compósito e

que a adição de fibras curtas de sisal, reduz parcialmente o benefício trazido pela fibra de vidro. Em todo caso, todas as misturas possuem MOR superior à matriz.

4.3.2.2.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores do MOR para os compósitos em questão é dado pela equação 4.5

$$\text{MOR} = 5,58 - 1,08X_1 + 2,12X_2 \quad (4.5)$$

A Tabela 4.17 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Os erros observados foram da ordem de 25%, com o modelo mostrando uma tendência de super-estimar os resultados experimentais.

TABELA 4.17 – Valores teóricos e experimentais do MOR para os compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	4,50	5,58	+24,0
2% Sisal curto	6,10	4,42	-27,5
1% Vidro longo	6,49	7,70	+18,6
2% Vidro longo	13,50	9,82	-27,2
1% Sisal curto e 1% Vidro longo	5,78	7,12	+23,2
2% Sisal curto e 2% Vidro longo	6,38	7,24	+13,5

4.3.2.2.3 Capacidade de absorver energia: índices de tenacidade T_{JCI} , FT e P/P_f

4.3.2.2.3.1 Efeitos principais e análise de variância no índice $T_{JCI, 1,8mm}$

A Figura 4.16 apresenta os valores do índice de tenacidade do material a 1,8 mm de deflexão (T_{JCI} a 1,8 mm). O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de curtas de sisal), foi estimado como um decréscimo de 0,4 KN.mm, sendo esse decréscimo observado apenas para o nível mais alto de X_2 , ou seja, quando já havia no compósito as fibras longas de vidro. Para o fator X_2 (fibras longas de vidro), a estimativa foi um aumento do T_{JCI} de 0,79 KN.mm, sendo maior esse aumento, quando não existia fibras

curtas de sisal. Em relação à interação entre os dois fatores, estima-se um decréscimo do T_{JCI} de 0,59 KN.mm.

A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.18 apresenta os resultados obtidos. Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.18, conclui-se que é estatisticamente significativa a ação de cada efeito principal.

TABELA 4.18– Análise de variância para o índice de tenacidade (T_{JCI}) calculado a uma deflexão de 1,8 mm para os compósitos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 0,4016	0,4840	1	0,4840	89,63	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,7916	1,8802	1	1,8802	348,19	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,5816	1,0150	1	1,0150	187,96	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,0437	8	0,0054				
Total		146,4	11					

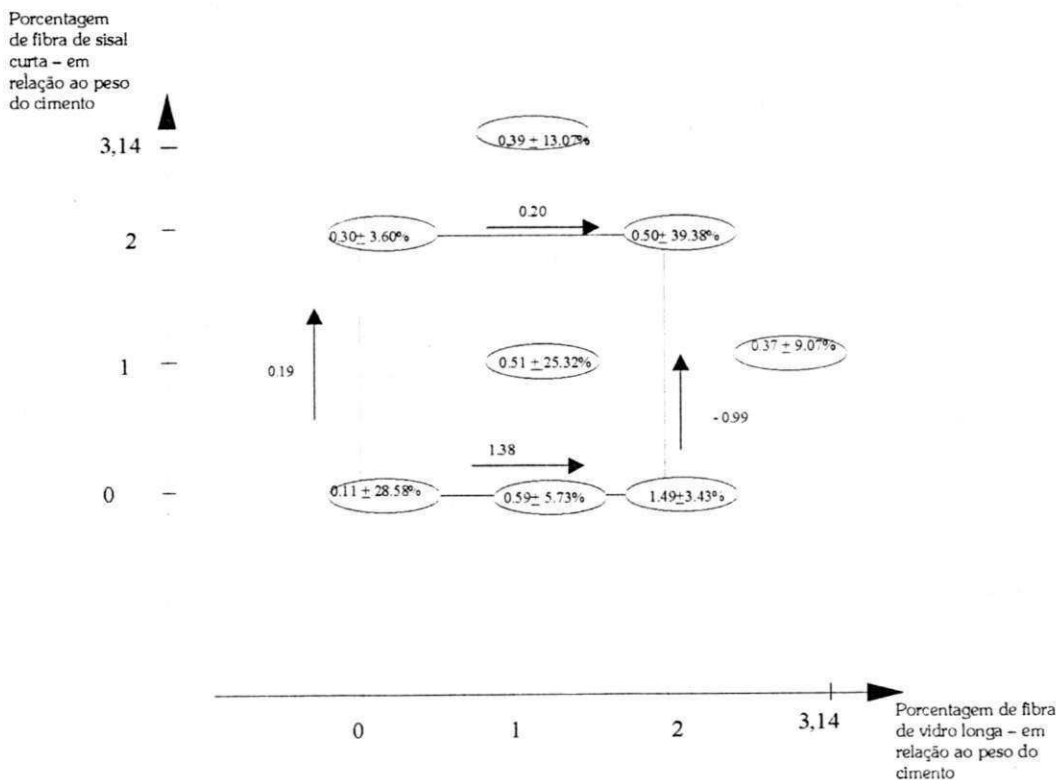


FIGURA 4.16 – Resultados de T_{JCI} a 1,8mm do compósito reforçado com fibras com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

4.3.2.2.3.2 Superfícies de resposta

O modelo matemático obtido para $T_{JCI, 1,8mm}$ é dado por:

$$T_{JCI, 1,8 \text{ mm}} = 0,30 - 0,05X_1 + 0,40 X_2 \quad (4.6)$$

A Tabela 4.19 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Assim como no desenho de fibras longas de sisal e curtas de vidro, os resultados indicam que o hiperplano ajustado aos dados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão não se ajustaram bem aos dados experimentais, pois erros de muito elevados foram observados. Uma equação de ordem superior poderia, provavelmente, promover um melhor ajuste.

TABELA 4.19 – Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} a 1,8mm de deflexão para o compósito híbrido reforçado com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,11	0,30	+273,6
2% Sisal curto	0,29	0,20	-31,1
1% Vidro longo	0,59	0,70	+18,6
2% Vidro longo	1,49	1,10	-35,45
1% Sisal curto e 1% Vidro longo	0,51	0,65	+2756
2% Sisal curto e 2% Vidro longo	0,50	1,00	+100

4.3.2.3.4 $T_{JCI, 4,0mm}$, FT e P/P_f

Com relação ao índice de tenacidade do material a 4 mm de deflexão (T_{JCI} a 4 mm), observa-se que a presença da fibra de sisal passa a ser mais significativa. Os valores de FT mostram um comportamento semelhante ao observado para T_{JCI} ,

1,8mm. Uma melhor observação do mecanismo de absorção de energia pode ser observado nos índices P/P_f mostrado na Figura 4.17.

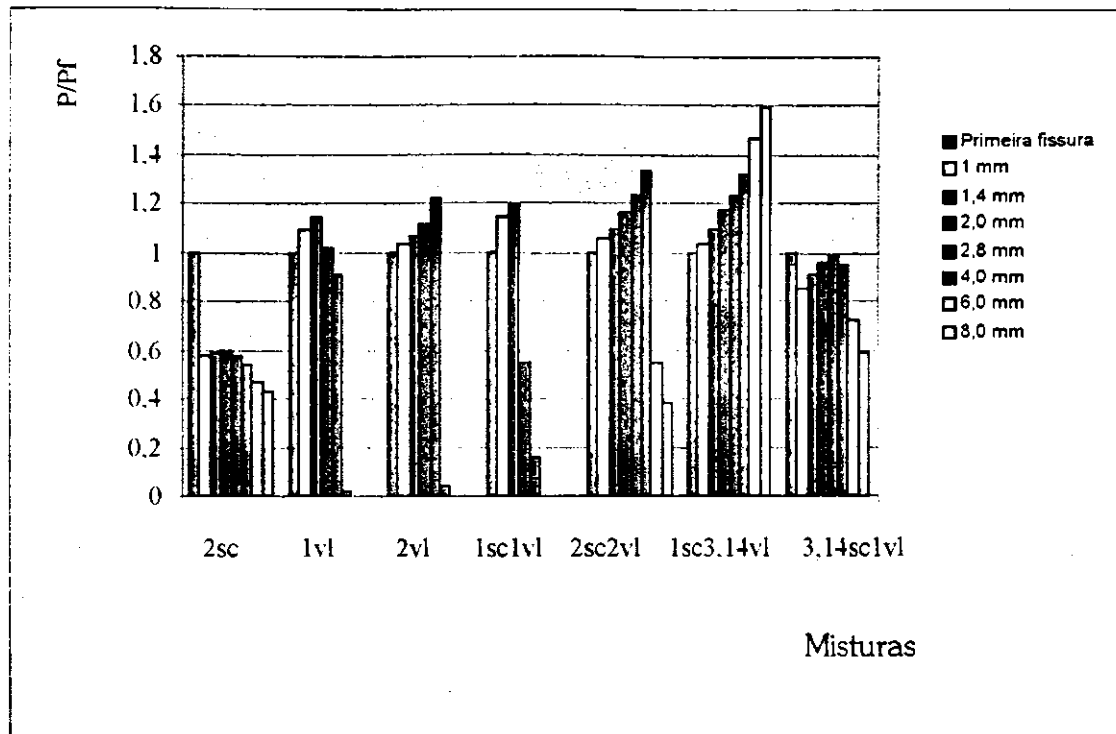


FIGURA 4.17 – Comportamento pós fissuração dos compósitos com fibras longas de vidro e curtas de sisal – Relação P/P_f (Carga à determinada deflexão/ Carga de primeira fissura)

Quando se adicionou ao compósito de fibra curta de sisal, uma certa porcentagem de fibra longa de vidro, nota-se perfeitamente o efeito da hibridização entre as fibras. O comportamento pós-fissuração do material foi significativamente melhorado. Por exemplo, nos compósitos reforçados com 1% de fibras curtas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro e 2% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras longas de vidro, chega-se a aumentar, em até 60%, a carga de primeira fissura, para deflexões superiores a 6,0mm.

4.3.2.3 – Compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

A Figura 4.18 mostra as curvas carga-deflexão da matriz e dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro. Na Tabela 4.20 encontram-se os valores do Módulo de Ruptura (MOR) dos Índices de Tenacidade (T_{JCI}), correspondentes à deflexão de 1,8mm (L\150) e 4mm e do Fator de Tenacidade (FT).

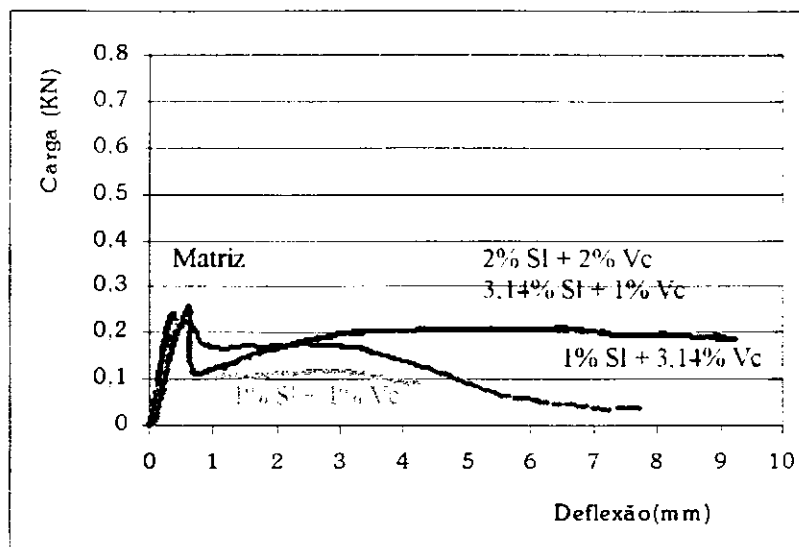


FIGURA 4.18 – Curvas típicas carga-deflexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

TABELA 4.20 – Módulo de Ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade (FT) dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

MISTURA	MOR (MPa) – CV%	T_{JCI} (1,8mm) KN.mm – CV(%)	T_{JCI} (4mm) KN.mm – CV(%)	FT (MPa) – CV(%)
Matriz	4,50 – 4,61	0,11 – 28,60	-	1,32 – 29,90
1% Sisal longo e 1% Vidro curto	4,54 – 0,86	0,26 – 18,67	0,58 – 15,34	3,15 – 16,90
2% Sisal longo e 2% Vidro curto	5,33 – 11,88	0,34 – 52,55	0,81 – 38,62	4,19 – 52,44
1% Sisal longo e 3,14% Vidro curto	4,24 – 14,02	0,26 – 18,65	0,61 – 14,07	3,10 – 13,14
3,14% Sisal longo e 1% Vidro curto	5,51 –	0,47 –	0,95 –	5,52 –
1% Sisal longo	4,92 – 7,98	0,28 – 20,94	0,65 – 21,61	3,77 – 28,14
2% Sisal longo	6,60 –	0,28 –	0,76 –	3,80 –
1% Vidro curto	4,87 – 25,2	0,14 – 1,27	-	1,72 – 4,81
2% Vidro curto	6,56 –	0,20 –	0,24 –	2,11 –

4.3.2.3.1 Carga de primeira fissura (FCload)

4.3.2.3.1.1 Efeitos principais e análise de variância

A Figura 4.19 apresenta os valores médios da carga de primeira fissura (em kN) e o coeficiente de variação (em %) para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro. Desses resultados calculou-se a influência dos fatores X_1 (% de fibras curtas de sisal) e X_2 (% de fibras curtas de vidro) e da interação entre eles, na carga de primeira fissura das misturas.

No caso do uso de fibras longas de sisal e curtas de vidro, ao se aumentar a porcentagem de fibras de sisal de 0% para 2%, observa-se um decréscimo de carga de primeira fissura de 0,02 kN; sendo que esse decréscimo ocorre devido à redução observado no nível mais alto de X_2 , onde existe a presença da fibra de vidro. Com relação ao *efeito principal* X_2 , nota-se que, se aumentarmos a porcentagem de fibras curtas de vidro de 0% para 2%, ocorre um aumento da carga de primeira fissura, de 0,06 kN. Esse aumento é maior quando a fibra de vidro se encontra sozinha, ou seja, no nível baixo de X_1 . Uma estimativa do *efeito principal* da interação entre os dois fatores é um decréscimo de 0,05 KN. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.21 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 4.21 – Análise de variância para a carga de primeira fissura (FCload) obtida dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 0,2	0,00101	1	0,00101	2,30	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,06	0,01021	1	0,01021	23,20	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,05	0,00701	1	0,00701	15,93	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,0035	8	0,00044				
Total		0,0217	11					

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.21, observa-se que é significativo o acréscimo em FCload em virtude da adição de fibra de vidro e que a redução produzida pela adição de sisal não é significativa, mas o efeito conjunto das

duas fibras reduz, estatisticamente, o FClload. Deve-se notar que para todos os compósitos a carga de primeira fissura é superior à da matriz.

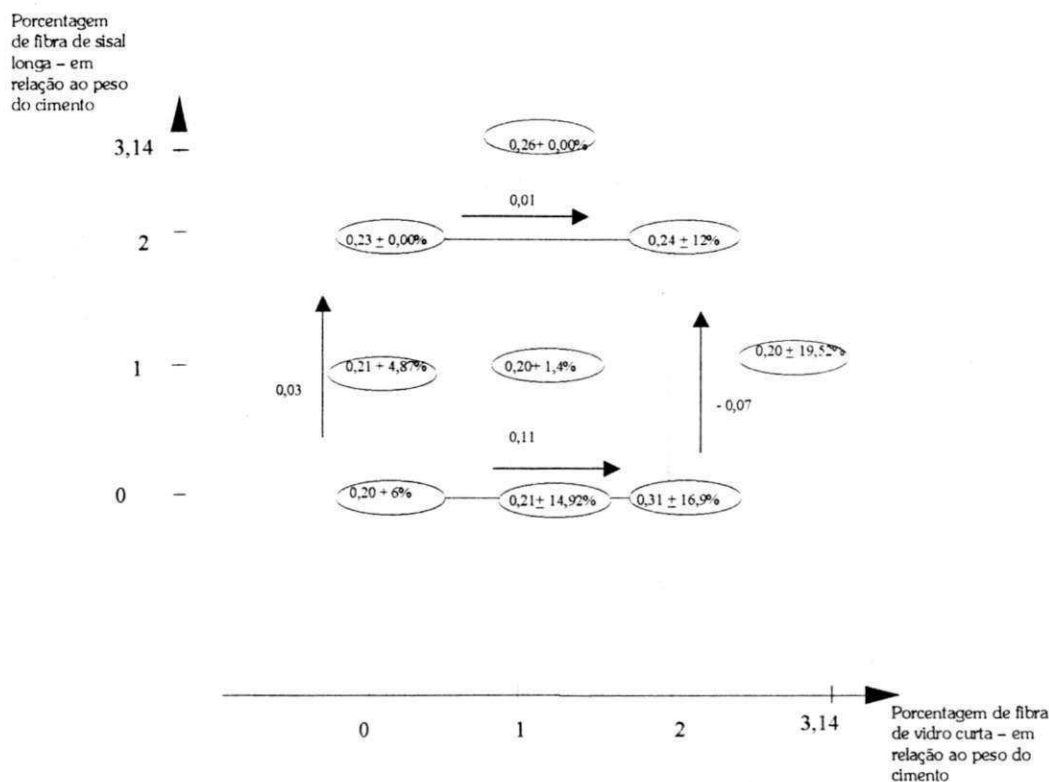


FIGURA 4.19 – Carga de primeira fissura (FClload) obtidas dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

4.3.2.3.1.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores da carga de primeira fissura para os compósitos em questão é dado pela equação 4.7:

$$FCLOAD = 0,23 - 0,01X_1 + 0,03X_2 \quad (4.7)$$

A Tabela 4.22 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Os erros observados variaram de 5 a 25%, mostrando que os resultados teóricos se ajustaram razoavelmente bem aos experimentais.

TABELA 4.22 – Valores teóricos e experimentais da FClload para os compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,20	0,23	+15 %
1% Sisal longo	0,21	0,22	+4,76
2% Sisal longo	0,23	0,21	- 8,7
1% Vidro curto	0,21	0,26	+23,8
2% Vidro curto	0,31	0,37	-19,3
1% Sisal longo e 1% Vidro curto	0,20	0,25	+25,0
2% Sisal longo e 2% Vidro curto	0,24	0,27	-12,5

4.3.2.3.2 Módulo de ruptura (MOR)

4.3.2.3.2.1 Efeitos principais e análise de variância

Na Figura 4.20, apresenta-se os valores do módulo de ruptura (MOR) do material. O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de longas de sisal), foi estimado como sendo um aumento no MOR de 0,44 MPa, decorrente do aumento observado no nível mais baixo de X_2 , ou seja, quando não havia, no compósito, fibras curtas de vidro. Para o fator X_2 (fibras curtas de vidro), a estimativa foi um aumento no MOR de 0,40 MPa, tendo esse aumento ocorrido onde não existe fibra curta de sisal. Em relação à interação entre os dois fatores, estima-se um decréscimo do MOR de 1,66 MPa.

A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.23 apresenta os resultados obtidos. Observa-se que é significativo apenas o efeito da interação entre as fibras. É importante notar que o módulo de ruptura da matriz foi aumentado para todas as misturas, com exceção da mistura com 3,14% de fibras curtas de vidro e 1% de fibras longas de sisal que apresentam uma redução de cerca de 5%.

TABELA 4.23 – Análise de variância para os resultados do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						F _{0,05-1,8}	F _{0,025-1,8}	F _{0,01-1,8}
Sisal	0,44	0,58	1	0,58	0,47	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,40	0,48	1	0,48	0,40	5,32	7,57	11,26
Interação	- 1,66	8,31	1	8,31	6,81	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		9,81	8	1,22				
Total		19,18	11					

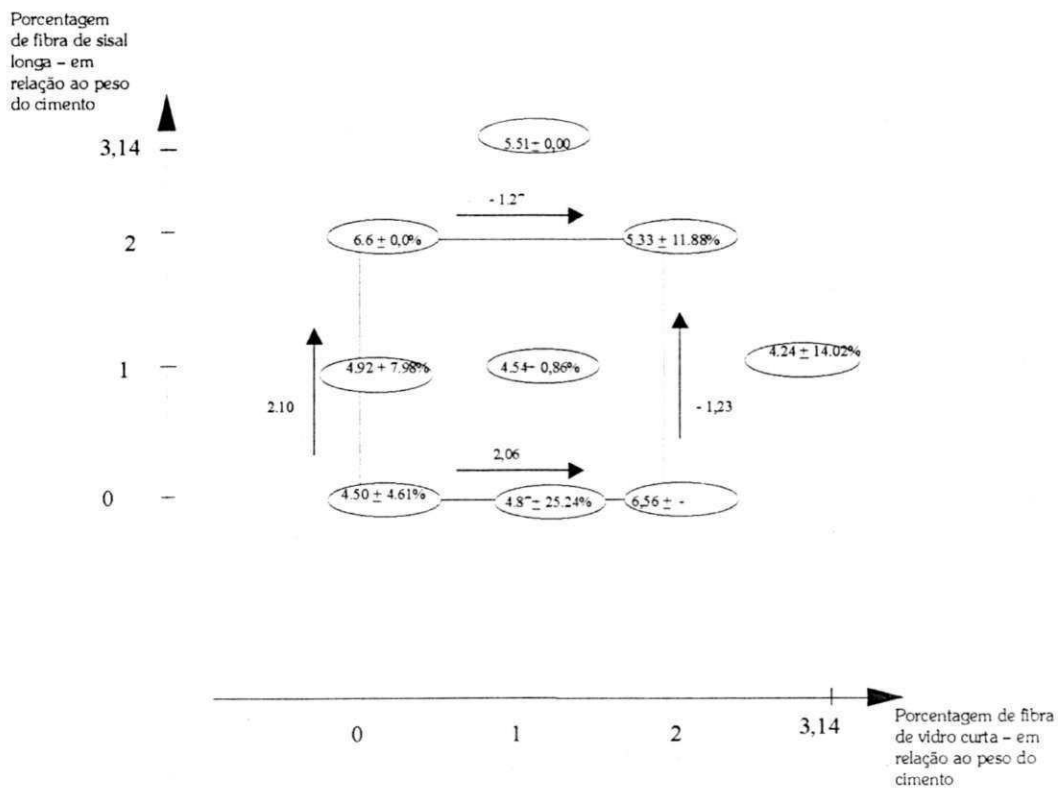


FIGURA 4.20 – Resultados do MOR dos compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro

4.3.2.3.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores do MOR para os compósitos em questão é dado pela equação 4.8

$$\text{MOR} = 5,14 + 0,41X_1 + 0,01X_2 \quad (4.8)$$

A Tabela 4.24 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Os erros observados foram inferiores a 22%, mostrando que os resultados teóricos se ajustaram razoavelmente bem aos experimentais.

TABELA 4.24 – Valores teóricos e experimentais do MOR para os compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	4,50	5,14	+14,2
1% Sisal longo	4,92	5,55	+12,8
2% Sisal longo	6,6	5,96	-10,0
1% Vidro curto	4,87	5,15	+ 6,4
2% Vidro curto	6,56	5,16	-21,3
1% Sisal longo e 1% Vidro curto	4,54	4,96	+9,25
2% Sisal longo e 2% Vidro curto	5,33	5,98	+12,2

4.3.2.3.3 Capacidade de absorver energia: índices de tenacidade T_{JCI} , FT e P/P_f

4.3.2.3.3.1 Efeitos principais e análise de variância no índice $T_{JCI, 1,8mm}$

Na Figura 4.21, apresenta-se os valores do índice de tenacidade do material, calculado a 1,8 mm de deflexão (T_{JCI} a 1,8 mm). O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de longas de sisal), foi um aumento de 0,11 KN.mm. Para o fator X_2 (fibras curtas de vidro), a estimativa foi um aumento do T_{JCI} de 0,13 KN.mm, sendo maior esse aumento, para onde não existia fibra curta de sisal. Em relação à interação entre os dois fatores, observa-se um decréscimo do T_{JCI} de 0,017 KN.mm. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.25 apresenta os resultados obtidos.

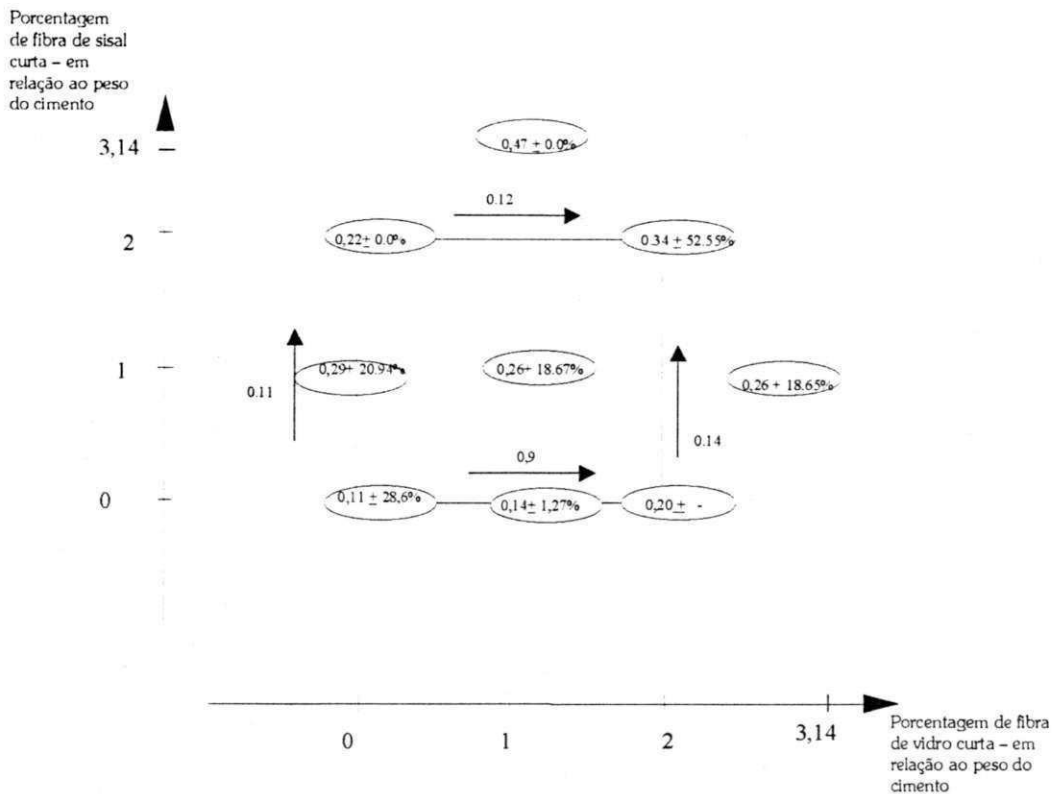


FIGURA 4.21 – Resultados do T_{JCI} a 1,8mm do compósito reforçado com fibras longas de sisal e curtas vidro.

TABELA 4.25 – Análise de variância para o índice de tenacidade (T_{JCI}) calculado a uma deflexão de 1,8 mm para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e curtas de vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						F _{0,05-1,8}	F _{0,025-1,8}	F _{0,01-1,8}
Sisal	0,11	0,0347	1	8,7	8,67	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,13	0,05	1	12	12	5,32	7,57	11,26
Interação	0,017	0,00083	1	0,21	0,20	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,032	8	0,004				
Total		0,1152	11					

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.25, observa-se que o efeito fibra de sisal e vidro é significativo com 95% de confiabilidade e que não é significativa a interação entre as duas fibras.

4.3.2.3.2 Superfície de resposta

O modelo matemático obtido para $T_{JCI, 1,8mm}$ é dada por:

$$T_{JCI, 1,8mm} = 0,16 + 0,05X_1 - 0,02X_2 \quad (4.9)$$

A Tabela 4.26 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Assim como no desenho de fibras curtas de sisal e vidro, os resultados indicam que o hiperplano ajustado aos dados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão não se ajustaram bem aos dados experimentais, pois erros de até 47% foram observados. Uma equação de ordem superior poderia, provavelmente, promover um melhor ajuste.

TABELA 4.26 – Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} a 1,8mm de deflexão para o compósito híbrido reforçado com fibras longas de sisal e de curtas vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,11	0,16	+45,5
1% Sisal longo	0,28	0,21	- 27,5
2% Sisal longo	0,29	0,26	- 10,0
1% Vidro curto	0,14	0,14	- 0,0
2% Vidro curto	0,20	0,12	-40,0
1% Sisal longo e 1% Vidro curto	0,26	0,19	-17,0
2% Sisal longo e 2% Vidro curto	0,34	0,18	- 47,1

4.3.2.3.4 $T_{JCI, 4,0mm}$, FT e P/P_f

Com relação ao índice de tenacidade do material a 4 mm de deflexão (T_{JCI} a 4 mm), observa-se que a presença da fibra longa de sisal garante a capacidade de absorver energia dos compósitos, sendo mais significativo o incremento para os teores de fibras de 2 e 3,14%. Comportamento similar é observado nos valores de FT. Uma melhor observação desse mecanismo pode ser observado nos índices P/P_f mostrado na Figura 4.22.

Observa-se que a fibra longa de sisal, sozinha, consegue absorver bastante energia, permitindo grandes deflexões, mantendo cargas relativamente altas na pós-fissuração do compósito, enquanto que, a fibra curta de vidro não contribui significativamente para o comportamento pós-pico do material.

Quando se misturou ao compósito de fibra curta de vidro, uma certa porcentagem de fibra longa de sisal, o comportamento pós-fissuração do material foi alterado. Nos compósitos com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro, observa-se que a fibra de vidro atenua a queda da carga de fissuração (a capacidade de carga sofre uma queda de aproximadamente 20%, enquanto que no compósito apenas com fibras longas de sisal a queda é de 40%) e mantém valores de carga pós-pico de até 60% da carga de fissuração para uma deflexão de 2,8 mm. Um comportamento semelhante foi observado para o compósito com 1% de fibras longas de sisal e 3,14% de fibras curtas de vidro que, em acréscimo a essa mesma característica, apresentou maior ductilidade pós-pico. Por exemplo, a carga pós-fissuração é cerca de 60% da carga de fissuração foi mantida até uma deflexão de 6,0mm. As outras duas misturas, com 2% de fibras longas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro, e, 3,14% de fibras curtas de vidro e 1% de fibras longas de sisal, mostraram comportamento semelhante, onde, após a ruptura do material, a carga sofre uma queda e depois volta a subir, alcançando deflexões de até 8,0mm com $P/P_{f\ 6,0\text{ mm}}$ da ordem de 0,6.

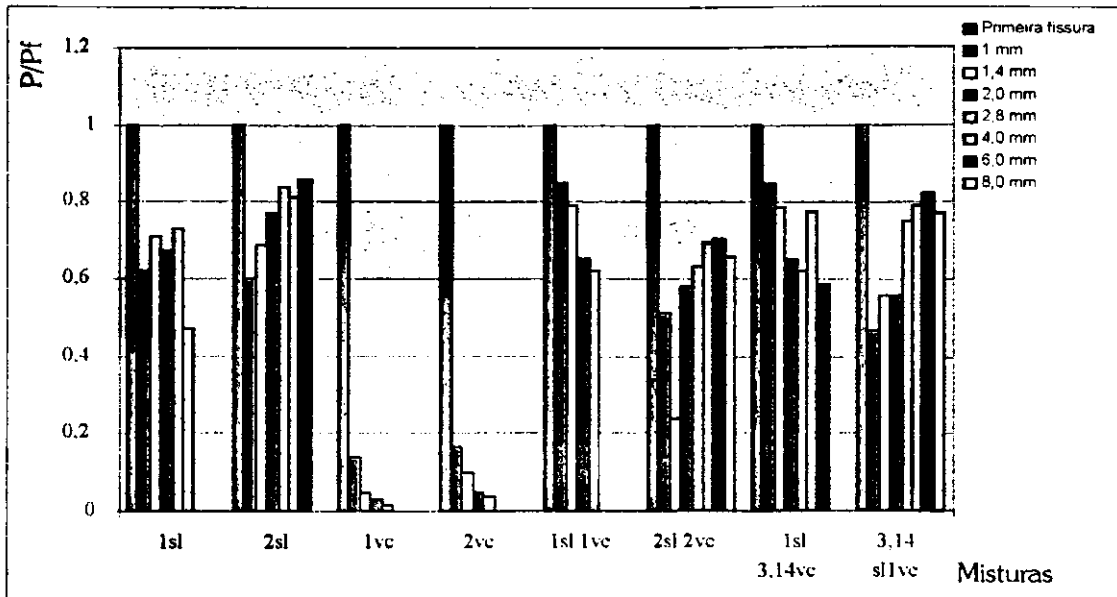


FIGURA 4.22 – Comportamento pós fissuração dos compósitos com fibras longas de sisal e curtas de vidro – Relação P/Pf (Carga à determinada deflexão/Carga de primeira fissura).

4.3.2.4 – Compósitos reforçados com fibras longas de sisal e de vidro.

A Figura 4.23 apresenta as curvas típicas carga – deflexão da matriz e dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e de vidro. A partir dessa figura pode-se ver, claramente, o efeito da hidridização dos dois reforços.

No compósito com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro, nota-se que, após a fissuração, as fibras de vidro promovem uma elevação na carga, devido a seu alto módulo de elasticidade, para só então começar a ocorrer uma queda na capacidade de carga do material, onde entra em funcionamento as fibras de sisal, com seu baixo módulo de elasticidade, absorvendo energia, dando ductilidade ao compósito e mantendo parte da carga de primeira fissura para deflexões de até 9,0mm.

Quando se aumentou os teores de fibras longas de sisal e de vidro para 2%, nota-se que, a carga cresce gradativamente, desde a fissuração, até uma deflexão de 4,0mm quando a fibra de sisal passou a atuar sozinha, mantendo a carga a um nível de aproximadamente 50% do valor da carga de ruptura do material até uma deflexão de 10mm.

Ao se manter o teor de fibras longas de sisal em 1% e aumentar-se o de fibras longas de vidro para 3,14%, nota-se um aumento significativo na capacidade de carga pós-fissuração do material. A redução da carga ocorre a uma deflexão de 4,0mm e uma resistência residual ainda é observada devido à presença da fibra de sisal. Essa resistência é inferior à da mistura discutida anteriormente.

Na mistura em que se usou o teor de 3,14% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro, o resultado não foi tão significativo quanto os outros, mas existe uma alta capacidade de absorver energia pode ser também observada.

A Tabela 4.27 apresenta os valores do Módulo de Ruptura (MOR) dos Índices de Tenacidade (T_{JCI}), correspondentes à deflexão de 1,8mm (L\150) e 4mm e do Fator de Tenacidade (FT), da matriz e dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e de vidro.

TABELA 4.27 – Módulo de Ruptura (MOR), índice de tenacidade e fator de tenacidade (FT) dos compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e vidro.

MISTURA	MOR (MPa) - CV(%)	T _{JCI} (1.8mm) KN.mm - CV(%)	T _{JCI} (4mm) KN.mm - CV(%)	FT (MPa) - CV(%)
Matriz	4.50 - 4.61	0.11 - 28.60	-	1.32 - 29.90
1% Sisal longo	4.92 - 7.98	0.28 - 20.94	0.65 - 21.61	3.77 - 28.14
2% Sisal longo	6.60 -	0.28 -	0.76 -	3.80 -
1% Vidro longo	6.48 - 8.37	0.59 - 5.73	0.93 - 26.70	7.15 - 5.65
2% Vidro longo	13.50 - 2.19	1.49 - 3.43	3.59 - 14.18	14.46 - 2.17
1% Sisal longo e 1% Vidro longo	6.20 - 4.26	0.64 - 32.42	0.89 - 23.19	7.45 - 26.97
2% Sisal longo e 2% Vidro longo	10.06 - 4.96	0.76 - 9.37	2.10 - 30.69	8.98 - 14.55
1% Sisal longo e 3.14% Vidro longo	10.85 - 35.27	0.82 - 11.10	2.38 - 43.05	8.34 - 13.88
3.14% Sisal longo e 1% Vidro longo	4.86 - 18.55	0.24 - 11.36	0.75 - 16.86	2.84 - 17.02

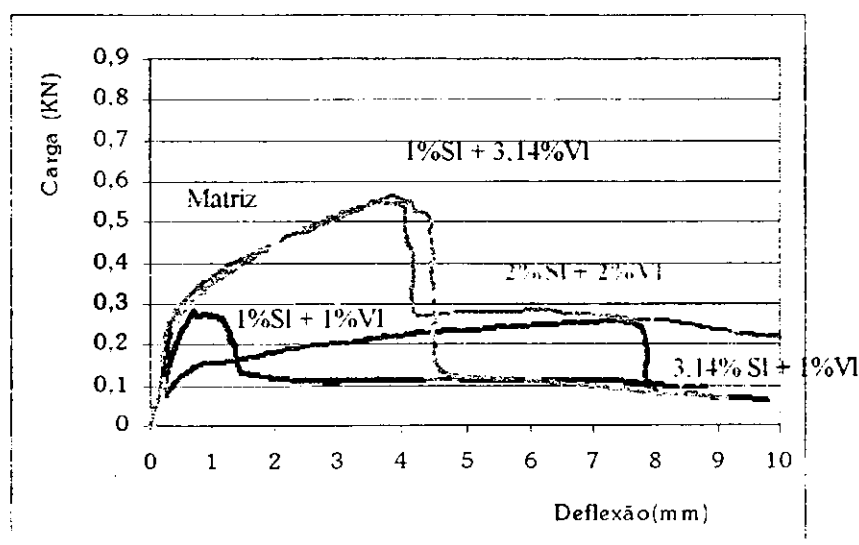


FIGURA 4.23 - Curvas típicas carga – deflexão da matriz e dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e vidro.

4.3.2.4.1 Carga de primeira fissura (FCLoad)

4.3.2.4.1.1 Efeitos principais e análise de variância

Na Figura 4.24, apresentam-se os valores médios da carga de primeira fissura (em kN) e o coeficiente de variação (em %) para os compósitos reforçados com

fibras longas de sisal e vidro. Com esses resultados calcula-se a influência dos fatores X_1 (% de fibras curtas de sisal) e X_2 (% de fibras longas de vidro) e da interação entre eles, na carga de primeira fissura das misturas.

Usando-se fibras longas de sisal e de vidro como reforço dos compósitos, aumentar a porcentagem de fibras de sisal de 0% para 2%, resultou num decréscimo da carga de primeira fissura de 0,06 kN; sendo que esse decréscimo ocorre devido à redução observado no nível mais alto de X_2 , onde existe a presença da fibra de vidro. Estimando-se o *efeito principal* do fator X_2 , nota-se que, se aumentarmos a porcentagem de fibras longas de vidro de 0% para 2%, ocorre um aumento da capacidade de carga, de 0,32 kN. Esse aumento é maior quando a fibra de vidro se encontra sozinha, ou seja, no nível baixo de X_1 . Uma estimativa do *efeito principal* da interação entre os dois fatores é de um decréscimo de 0,10 kN na carga de primeira fissura. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.28 apresenta os resultados obtidos. Com base nesses resultados, conclui-se que todos os fatores são significativos.

TABELA 4.28– Análise de variância para a carga de primeira fissura (FCload) obtida dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 0,66	0,013	1	0,013	53,2	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,32	0,301	1	0,301	1203,2	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,10	0,028	1	0,028	112,0	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,002	8	0,00025				

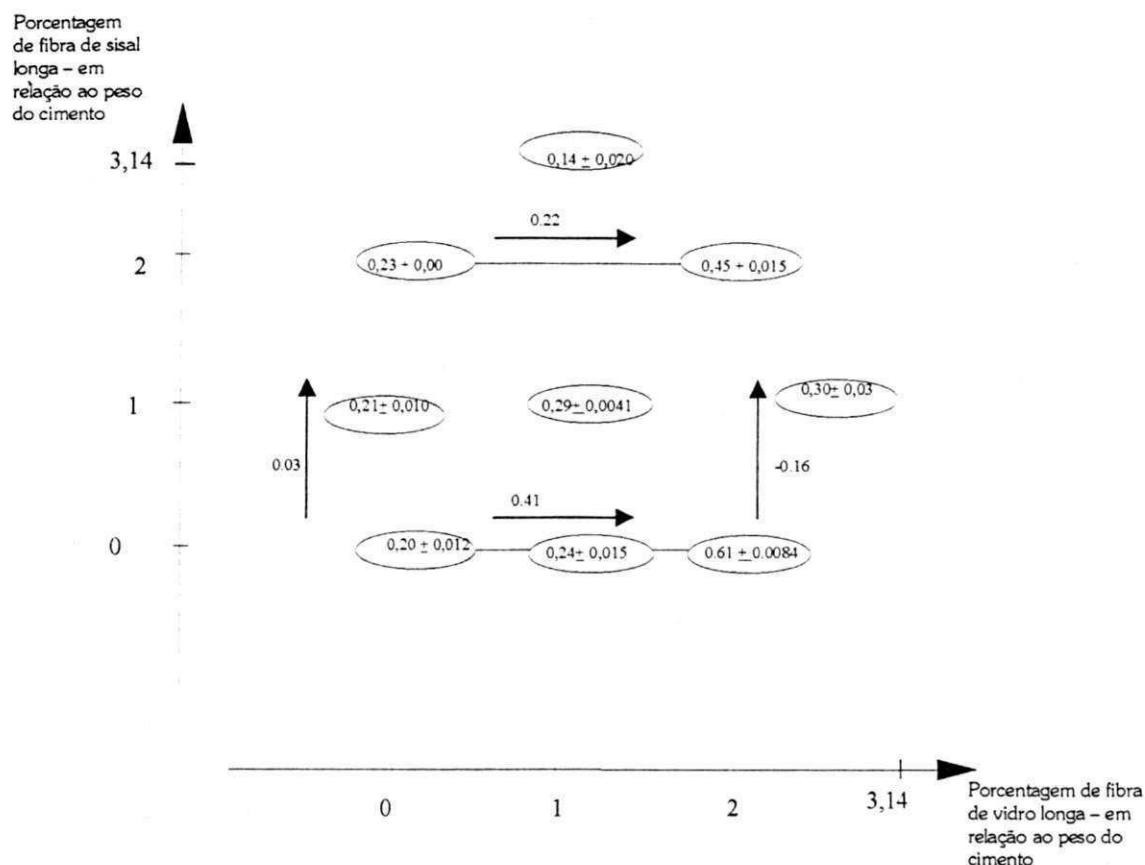


FIGURA 4.24 – Carga de primeira fissura (FCload) obtida dos ensaios de flexão dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e de vidro.

4.3.2.4.1.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores da carga de primeira fissura para os compósitos em questão é dado pela equação 4.10:

$$FCLOAD = 0,25 - 0,03X_1 + 0,16X_2 \quad (4.10)$$

A Tabela 4.29 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Com exceção da mistura reforçada com 1% de vidro longo, que apresentou um erro de 70%, observa-se que o modelo teórico consegue prever razoavelmente a carga de primeira fissura.

TABELA 4.29 – Valores teóricos e experimentais da FClload para os compósitos híbridos reforçados com fibras curtas de sisal e longas de vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,20	0,25	+25
1% Sisal longo	0,21	0,22	+4,7
2% Sisal longo	0,23	0,19	-17,5%
1% Vidro longo	0,24	0,41	+70
2% Vidro longo	0,61	0,57	-6,6
1% Sisal longo e 1% Vidro longo	0,29	0,38	+31,0
2% Sisal longo e 2% Vidro longo	0,45	0,54	+20,0

4.3.2.4.2 Módulo de ruptura

4.3.2.4.2.1 Efeitos principais e análise de variância

A Figura 4.25 apresenta o módulo de ruptura (MOR) dos compósitos. O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de curtas de sisal), foi um decréscimo do MOR de 0,67 MPa, sendo esse decréscimo observado apenas para o nível mais alto de X_2 , ou seja, quando já havia no compósito 2% de fibras curtas de vidro.

O *efeito principal* do fator X_2 (fibras longas de vidro), foi estimado em um aumento de 6,23 MPa, sendo maior esse aumento no nível mais baixo de X_1 , ou seja, quando só tem fibra longa de vidro no compósito. Quanto a interação entre os dois fatores, estima-se o *efeito principal* em um decréscimo de 2,77 MPa no MOR do material. A significância de cada fator e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.30 apresenta os resultados obtidos. Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.30, foram significativos, nos três níveis testados, os efeitos da fibra longa de vidro e da interação entre as fibras. Para a fibra de sisal, só foram significativos, os resultados com 95% de certeza.

TABELA 4.30 – Análise de variância para os resultados do módulo de ruptura (MOR) dos compósitos reforçados com fibras longas de sisal e vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						F _{0,05-1,8}	F _{0,025-1,8}	F _{0,01-1,8}
Sisal	- 0,67	1,35	1	1,35	6,75	5,32	7,57	11,26
Vidro	6,23	116,38	1	116,38	581,19	5,32	7,57	11,26
Interação	- 2,775	23,21	1	23,21	115,5	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		1,6	8	0,2				
Total		142,43	11					

Porcentagem de fibra de sisal longa – em relação ao peso do cimento

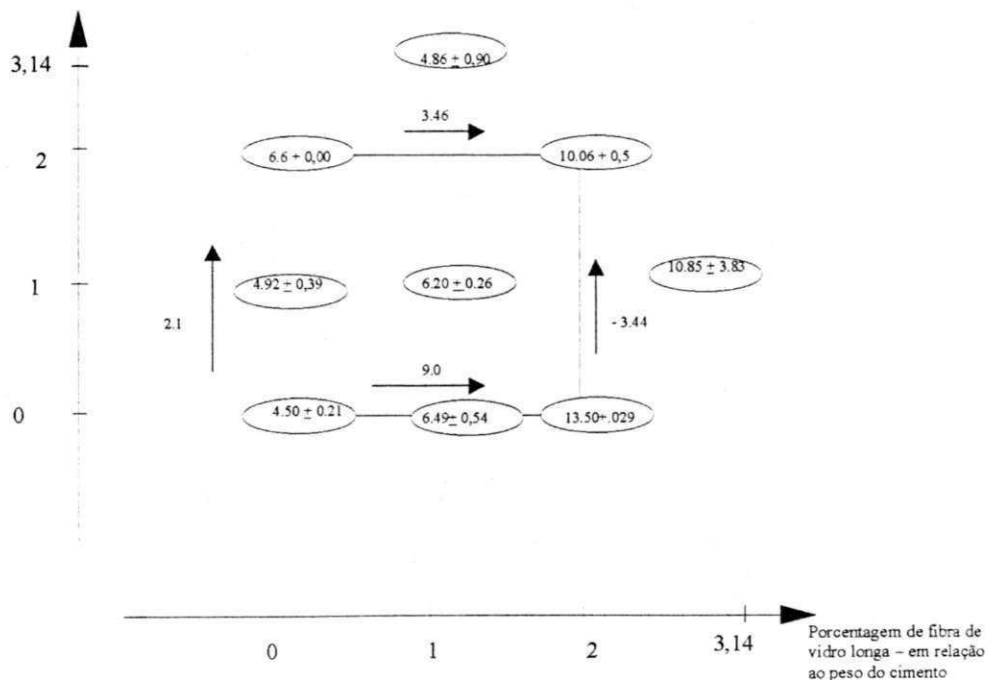


FIGURA 4.25 – Resultados do MOR dos compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e vidro.

4.3.2.4.2 Superfície de resposta

O modelo matemático que exprime os valores do MOR para os compósitos em questão é dado pela equação 4.11:

$$\text{MOR} = 5,5 - 0,14X_1 + 2,61X_2 \quad (4.11)$$

A Tabela 4.31 apresenta uma comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Com exceção da mistura reforçada com 1% de vidro longo e 1% de sisal longo, que apresentou um erro de 28,5%, observa-se que o modelo teórico consegue prever razoavelmente o módulo de ruptura.

TABELA 4.31 – Valores teóricos e experimentais do MOR para os compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	4,50	5,50	+22,2
1% Sisal longo	4,92	5,36	+8,9
2% Sisal longo	6,60	5,22	-20,1
1% Vidro longo	6,49	8,11	+24,9
2% Vidro longo	13,50	10,72	-20,5
1% Sisal longo e 1% Vidro longo	6,20	7,97	+28,5
2% Sisal longo e 2% Vidro longo	10,05	10,58	+5,3

4.3.2.4.3 Capacidade de absorver energia: índices de tenacidade T_{JCI} , FT e P/P_f

4.3.2.4.3.1 Efeitos principais e análise de variância no índice $T_{JCI, 1,8mm}$

Na Figura 4.26 encontram-se as médias do índice de tenacidade (T_{JCI}) a 1,8 mm de deflexão, dos compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e vidro. O *efeito principal* do fator X_1 (fibras de longas de sisal), foi um decréscimo de 0,32 KN.mm. Para o fator X_2 (fibras curtas de vidro), a estimativa foi um aumento do T_{JCI} de 0,94 KN.mm, sendo maior esse aumento, para onde não existia fibra curta de sisal. Em relação à interação entre os dois fatores, observa-se um decréscimo do T_{JCI} de 0,43 KN.mm. A significância de cada efeito e da interação foi testada a níveis de confiança de 95%, 97% e 99% usando-se o teste F. A Tabela 4.32 apresenta os resultados obtidos. Com base nesses resultados, conclui-se que foram significativos, para os três níveis testados, os fatores estudados.

Porcentagem de fibra de sisal longa – em relação ao peso do cimento

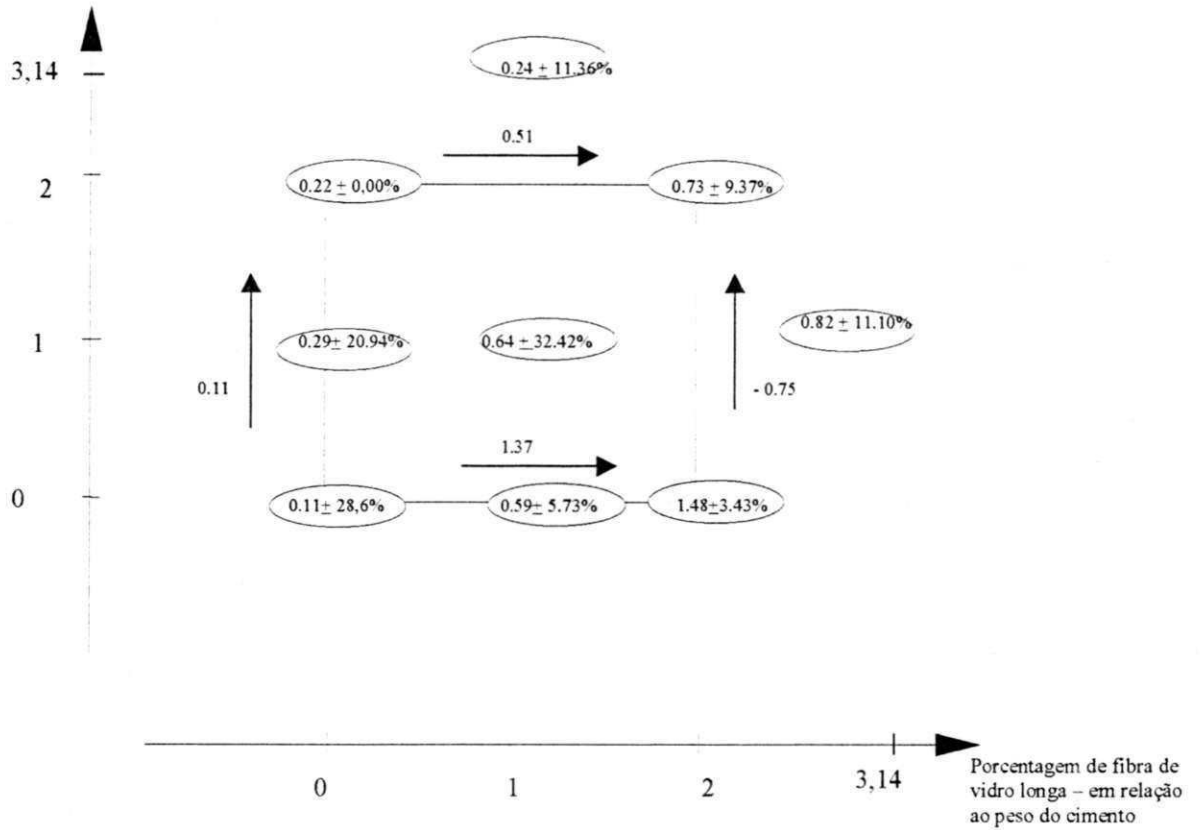


FIGURA 4.26 – Valores de (TJCI) a 1,8 mm de deflexão para os compósitos híbridos reforçados com fibras longas de sisal e de vidro

TABELA 4.32 – Análise de variância para o índice de tenacidade (T_{JCI}) calculado a uma deflexão de 1,8 mm para os compósitos reforçados com fibras longas de sisal e vidro

Fonte de variação	Efeito Principal	SQ Soma dos quadrados	GL	Mr Média quadrada	Fo Relação média quadrada (Msr)	MSR mínimo para um fator ser significativo		
						$F_{0,05-1,8}$	$F_{0,025-1,8}$	$F_{0,01-1,8}$
Sisal	- 0,32	0,31	1	0,31	195,05	5,32	7,57	11,26
Vidro	0,94	2,67	1	2,67	1694,98	5,32	7,57	11,26
Interação	- 0,43	0,555	1	0,555	352,19	5,32	7,57	11,26
Erro Experimental		0,0126	8	0,001575				
Total		3,54	11					

4.3.2.4.3.2 Superfície de resposta

O modelo matemático obtido para T_{JCI} 1,8mm é dada por:

$$T_{JCI} \text{ 1,8 mm} = 0,20 - 0,01X_1 + 0,50X_2 \quad (4.12)$$

A Tabela 4.33 apresenta a comparação entre os valores teóricos e experimentais para os traços indicados. Assim como nos outros desenhos fatoriais, os resultados indicam que o hiperplano obtido dos dados de T_{JCI} a 1,8mm de deflexão não se ajusta bem aos dados experimentais. Uma equação de ordem superior poderia, provavelmente, promover um melhor ajuste.

TABELA 4.33 – Valores teóricos e experimentais do T_{JCI} a 1,8mm de deflexão para o compósito híbrido reforçado com fibras longas de sisal e vidro.

Traço	Valor experimental	Valor teórico	Erro(%)
Matriz	0,11	0,20	+81,8
1% Sisal longo	0,28	0,19	- 32,5
2% Sisal longo	0,29	0,18	- 38,0
1% Vidro longo	0,59	0,70	+18,6
2% Vidro longo	1,48	1,20	-19,0
1% Sisal longo e 1% Vidro longo	0,64	0,69	+7,9
2% Sisal longo e 2% Vidro longo	0,73	1,12	+53,4

4.3.2.3.4 $T_{JCI, 4,0mm}$, FT e P/P_f

Com relação ao índice de tenacidade do material calculado a 4,0mm de deflexão (T_{JCI} a 4 mm), observa-se que a presença da fibra longa de sisal aumenta a significativamente a capacidade de absorver energia dos compósitos. Uma melhor observação desse mecanismo pode ser notada dos índices P/P_f mostrados na Figura 4.3.2.3.4.1.

Já foi discutido que a fibra longa de sisal, sozinha, consegue absorver energia, permitindo grandes deflexões, mantendo cargas e, não deixando ocorrer quedas bruscas da capacidade de carga, e, as vezes permitindo até um certo aumento, na pós fissuração do compósito, enquanto que, a fibra longa de vidro promove sempre um aumento da capacidade de carga, contribuindo significativamente no comportamento pós pico do material.

Quando se adiciona ao compósito, fibra longa de vidro e fibra longa de sisal, nota-se as vantagens da hibridização. No compósito com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro, após a primeira fissura, a fibra de vidro contribuiu para manter a carga constante até a deflexão de 1 mm, onde a fibra de sisal fez com que a queda na capacidade de carga não fosse tão brusca (em torno de 25%).

No compósito com 2% de fibras longas de sisal e 2% de fibras longas de vidro, o comportamento pós fissuração foi diferente. Após a primeira fissura, a fibra de vidro permitiu um aumento de mais de 50% da carga sob uma deflexão de 1mm. Continuando com a capacidade de carga ascendendo, o compósito conseguiu chegar à deflexão de 2,8 mm com duas vezes o valor da carga de fissuração, onde, só então, caiu a capacidade de carga do material, e, a fibra longa de sisal, conseguiu manter a carga ainda maior que a carga de fissuração, até a deflexão de 6 mm.

A se usar 3,14% de fibras longas de vidro e 1% de fibras longas de sisal, o comportamento pós-fissuração do compósito foi semelhante à mistura com 2% de cada fibra, só que, pelo maior teor de fibra de vidro, a capacidade de carga foi elevada até uma deflexão maior (4 mm), e, com 6 mm de deflexão ainda existia uma carga 50% maior que a carga de primeira fissura, para só então haver queda e a fibra de sisal manter a carga em 50% do valor da carga de ruptura, na deflexão de 8 mm.

Com o compósito que continha 3,14% de fibra de sisal, foi difícil a trabalhabilidade da mistura, obtendo-se resultados não tão bons, mas que ainda representam o efeito benéfico das duas fibras, ou seja, a elevação da carga após a

ruptura, pela fibra de vidro, de acordo com seu teor (1%) e a manutenção da carga após a fissuração pela fibra de sisal.

Conclui-se então que o compósito híbrido de fibras longas de sisal e de vidro, somou as características das duas fibras, no comportamento pós-fissuração do material, de acordo com as porcentagens das mesmas, resultando num compósito que suporta altos carregamentos com deflexões consideráveis, conseguindo manter cargas razoáveis a altas deflexões.

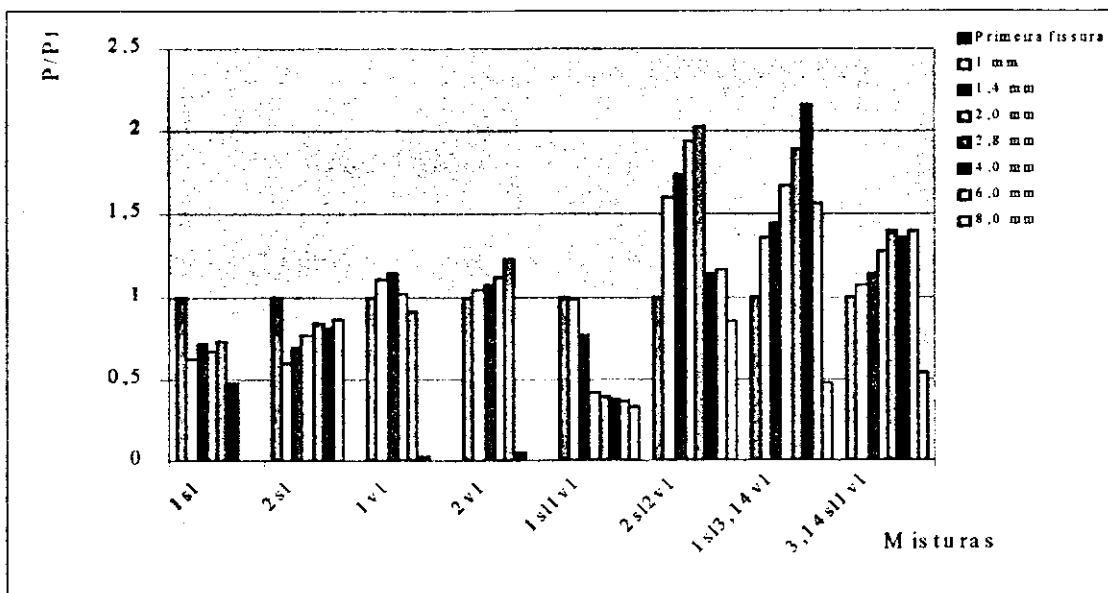


FIGURA 4.27 – Comportamento pós-fissuração dos compósitos híbridos de fibras longas de sisal e de vidro – Relação entre P/P_f(Carga à determinada deflexão/ Carga de primeira fissura).

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estudados compósitos híbridos formados por uma matriz frágil (argamassa) e reforçadas com fibras de baixo módulo de elasticidade (sisal) e de alto módulo de elasticidade (vidro). As fibras foram usadas em dois tamanhos diferentes – curtas (25mm) e longas (300mm) – fazendo-se as combinações possíveis entre elas. Análise fatorial de experimentos foi a técnica utilizada na definição do trabalho experimental. Os ensaios realizados foram o de tração indireta, compressão e flexão. Com base nos resultados obtidos pode-se tirar as seguintes conclusões:

1. Os ensaios de compressão, feitos apenas com fibras curtas, mostraram que:
 - As fibras de sisal fazem decrescer a resistência à compressão do compósito, sendo esse decréscimo maior para teores de fibras maiores.
 - As fibras de vidro praticamente não interferiram na resistência à compressão do compósito.
 - Os compósitos híbridos com 1% de fibras de sisal mantiveram a resistência próxima à da matriz, ao passo que o teor de 2% fez a resistência à compressão decrescer significativamente.
 - Apesar de fazerem decrescer a resistência, as fibras de sisal dão notável ductilidade ao compósito, sendo superiores às fibras de vidro isoladas.
 - O melhor comportamento em relação à compressão, foi observado nos compósitos híbridos reforçados com 1% de fibras de sisal e 1% de fibras de vidro ou 1% de fibras de sisal e 2% de fibras de vidro.
2. Os resultados dos ensaios de tração indireta, mostraram que é pequena a influência das fibras curtas na resistência do compósito. Em geral, percebeu-se um discreto aumento de resistência. No entanto, uma mudança significativa no modo de ruptura foi observado. As fibras cortaram o plano de ruptura mantendo unida as duas partes do corpo de prova para grandes deformações.

3. Os ensaios de flexão foram realizados com todas as combinações entre as fibras, curtas e longas, de sisal e de vidro. Destes pôde-se tirar as seguintes conclusões:
 - As fibras curtas de sisal deram maior ductilidade ao compósito que as fibras curtas de vidro. As fibras de vidro, por outro lado, foram mais eficientes no aumento da resistência da matriz.
 - Os compósitos com fibras longas foram os de melhor performance no que diz respeito tanto a um incremento na capacidade de carga quanto na capacidade de absorver energia. Pode-se atribuir às fibras longas de vidro o notável acréscimo de resistência observado e às fibras longas de sisal o grande aumento de tenacidade.
 - Os compósitos híbridos normalmente apresentaram valores de MOR inferiores ao da mistura reforçada com 2% de vidro (curto ou longo). A vantagem desses compósitos é que eles normalmente aumentavam a resistência das misturas reforçadas apenas com fibras de sisal e modificavam a forma da curva de carga-deflexão das misturas reforçadas apenas com fibra de vidro dando-lhe melhor comportamento pós-fissuração em deflexões mais altas.
4. No que se refere ao uso da análise fatorial de experimentos, pode-se concluir que ela é uma ferramenta muito útil e eficiente na definição de programas experimentais de investigação. As superfícies de resposta obtidas mostraram-se razoáveis para a simplicidade da equação matemática usada no presente estudo.
5. Para dar continuidade ao trabalho, sugere-se estudos de durabilidade do material; como também de aplicações práticas; ou ainda se variar quantitativamente componentes da matriz (teor d'água, por exemplo). Pode também ser feito um ajuste das curvas para obtendo-se melhores modelos matemáticos, etc..

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ☞ ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “Areia normal para ensaio de cimento”, Especificação brasileira, NBR 7214, 1982. EB – 1133.
- ☞ ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “Cimento portland – Determinação da resistência à compressão”, NBR 7215.
- ☞ ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “Cimento portland – Determinação da resistência à tração indireta”, NBR 7215.
- ☞ BAHIA. Secretaria de Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária, Coordenação de Economia Rural. O sisal na Bahia, Salvador, 1991, 41p.
- ☞ BARROS, M.A.L.; CARVALHO, O. S.; SILVA, O.R.R.F., “Economia e situação da cultura do sisal”. EMBRAPA – CNPA, Campina Grande, 1999 13 – 23pp.
- ☞ CARVALHO FILHO, (1997)
- ☞ COUTTS, R. S. P. & WARDEN, P. G. (1992) Sisal Pulp Reinforced Cement Mortar. Em Cement & Concrete Composites 17-21p.
- ☞ COUTTS, R. S. P. Wood fibre reinforced cement composites. Em: Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete. Editor: Swamy, R. N. (1988) 1- 58 pp.
- ☞ FÖRDOS, Z. Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites. Em: Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete. Editor: Swamy, R. N. (1988) 173 - 206 pp.
- ☞ GRAM, H.E. “Natural Fibre Concrete Roofing”, Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1983, 225 p.
- ☞ GRANNER, E.A.; GODOY JUNIOR. “Cultura da fazenda brasileira”, Melhoramentos, São Paulo, 1967, 461p.
- ☞ HULL, D. An introduction to composite materials. Cambridge University Press, 1992, 246 pp.
- ☞ KALAPRASAD, G. JOSEPH, K. AND THOMAS, S. (1995), Influence of Short Glass Fiber Addition on the Mechanical Properties of Sisal Reinforced Low Density Polyethylene Composites.
- ☞ LEAL, E.; SILVA, G.B.; COSTA, I.C.; SILVA, L.G.; PEREIRA, M.M.B.; QUEIROGA, O.M.; MIRANDA, O.V. “Sistema Agroindustrial do sisal na Paraíba”, UFPB, Campina Grande, 1997, 41p.

- ☞ LUTZENBERGER, S.C. "Guide for field crops in the tropics and subtropics, Agency for International Development, Washington, 1974, 321p.
- ☞ MARQUES, N. "O Sisal na Bahia", Salvador, 1978, 67p.
- ☞ MEDINA, J.C. "O sisal", Secretaria de Agricultura, São Paulo, 1954, 254p.
- ☞ MEDINA, J.C. "Plantas fibrosas da flora mineral". Instituto Agrônômico – Campinas, 1959.
- ☞ MOREIRA, J.A.N.; BELTRÃO, N.E.M.; SILVA, O.R.R.F., "Botânica e morfologia do sisal". In: Agronegócio do Sisal. Embrapa – CNPA, Campina Grande, 1999, 25 – 34 pp.
- ☞ NETO, M.S.A.; BELTRÃO, N.E.M. "Agronegócio do sisal no Brasil", Embrapa, CPI, CNPA, Campina Grande, 1994, pp.44 – 53.
- ☞ PAVITHRAN e cooperadores,(1991)
- ☞ PRATA, F.C. "Principais Culturas do Nordeste", ESAM, Mossoró – RN, 1983, 251p.
- ☞ RILEM DRAFT RECOMMENDATIONS. TESTING METHODS FOR FIBRE REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES. Test for the determination of modulus of rupture and limit of proportionality of thin fibre reinforced cement sections. Vol.17, nº 102, Nov/Dec. 1984.
- ☞ SANTOS, J.D. "Sisal", In: CONAB – Safra de verão – Preço mínimo. Brasília, DF, 1991.
- ☞ SARJA, A. Wood fibre reinforced concrete. In: Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete. Editor: Swamy, R. N. (1988) 63 - 88 pp.
- ☞ SILVA, D.D. "Agricultura do Sisal", In: Seminário do Agronegócio do Sisal, Cruz das Almas, 1996, 22p.
- ☞ SILVA, O.R.R.F.; CARVALHO, O.S.; ALVES, I.; VALLE, L.V. "Evaluacion de un protótipo descortizador de hojas de sisal. IN: Conferência Internacional de Mecanização Agrária, Zaragoza, 1993, pp. 269 – 276.
- ☞ SILVA, O.R.R.F.; CARVALHO, O.S.; RAMOS E.S.B.; "Cultivo do Sisal no Nordeste", In: O Agronegócio do sisal no Brasil, Embrapa, CPI, CNPA, Campina Grande, 1994, pp.53 – 92.
- ☞ TOLÊDO FILHO, R. D. (1997a) , Materiais Compósitos Reforçados *com* Fibras Naturais Vegetais. Cap. 3 Em: Materiais Não Convencionais para Construções Rurais. Editores: Tolêdo Filho, R. D.; Nascimento, J. W. B. do; Ghavami, K.; no XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, Brasil, 323pp.

- ☞ TOLÊDO FILHO, R. D. (1997b), Natural Fibre Reinforced Mortar Composites: Experimental Characterisation, DEC-PUC-Rio/DEC-Imperial College, London, U.K., 472pp, Ph.D Thesis.
- ☞ TOLÊDO FILHO, R. D. (1997c), Aproveitamento dos resíduos do desfibramento e beneficiamento do sisal como reforço de materiais de construção, Projeto submetido à avaliação do Banco Mundial\PRODETAB.
- ☞ Guodong e Xu & D. J. Hannant (1991)
- ☞ Barzin Mobasher e Cheng Yu Li (1996)
- ☞ G. Xu e outros(1996)
- ☞ TOLÊDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B. DO; GHAVAMI, K.; (1997d) “Materiais Não Convencionais para Construções Rurais”, no XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campina Grande, Brasil, 323pp.
- ☞ NAAMAN, A . E., (2000) Fiber reinforcement for concrete: looking back, looking ahead, In: Fifth International RILEM Symposium on Fibre – Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB’ 2000, Lion, pp 65-86
- ☞ PELED, A . ; CYR, m . ; SHAH, S.P. , (2000) – Hybrid Fibers in High Performances Extruded In: Fifth International RILEM Symposium on Fibre – Reinforced Concretes (FRC) – BEFIB’ 2000, Lion, pp 139 – 147
- ☞ BANTIA, N ; YAN, C. BINDIGANAVILE (2000) – Development and Application of High Performance Hybrid fiber reinforced concrete pp 471 - 480. ;
- ☞ FARIAS FILHO, João de (1999) – Tese de Mestrado na área de Construções Rurais, do curso de Engenharia Agrícola, na UFPB – Campus II

ANEXO I

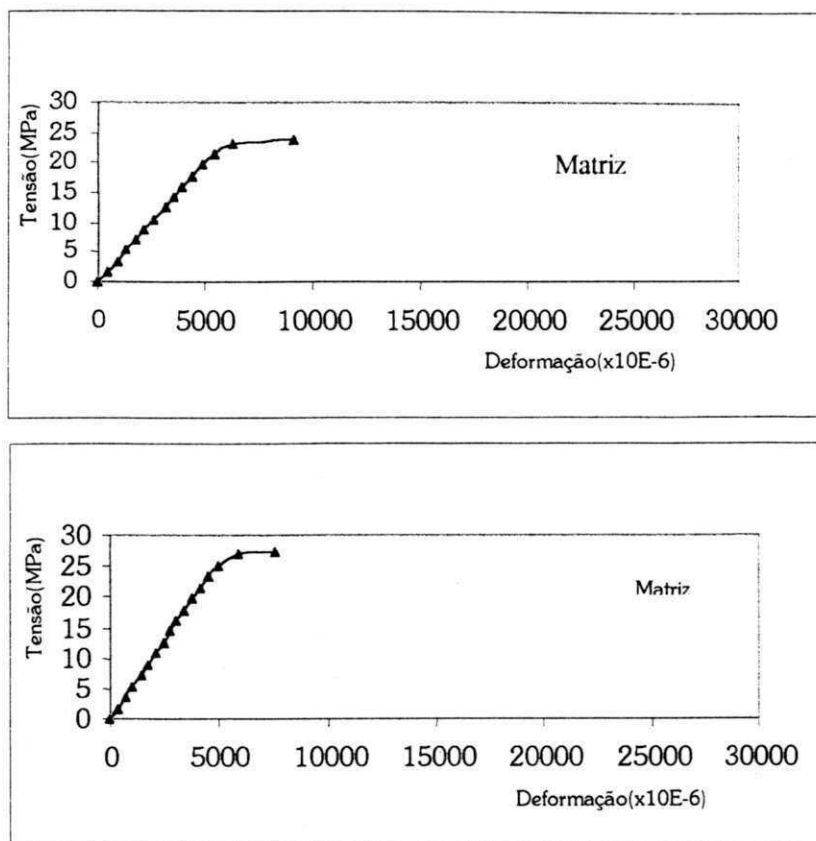


FIGURA A 1 – Curvas de tensão – deformação da matriz

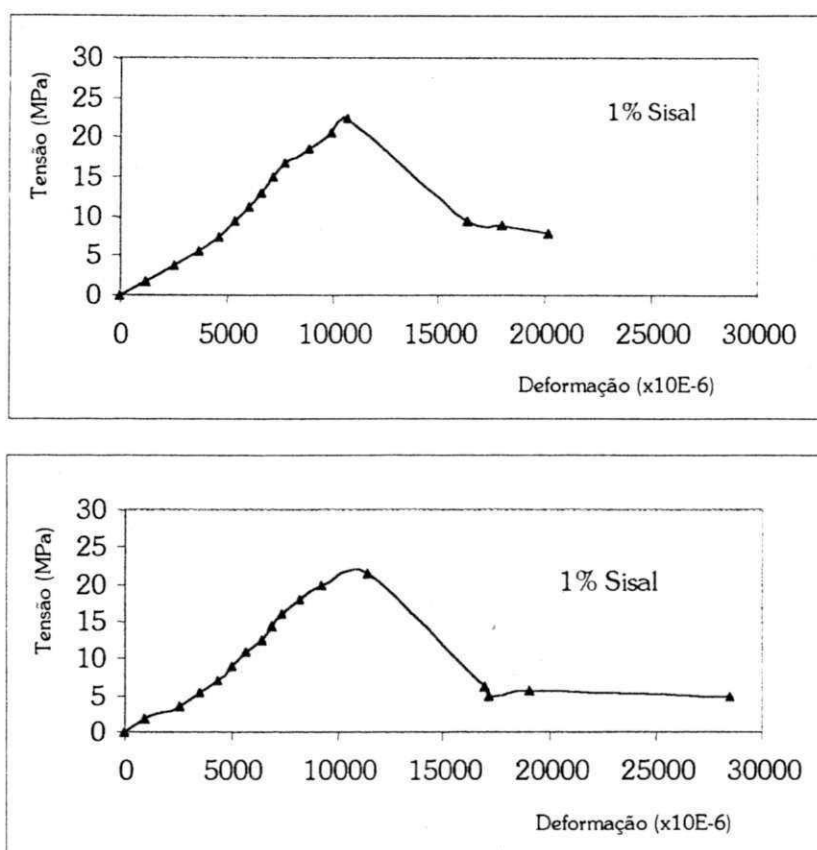


FIGURA A 2 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 1% de fibras curtas de sisal.

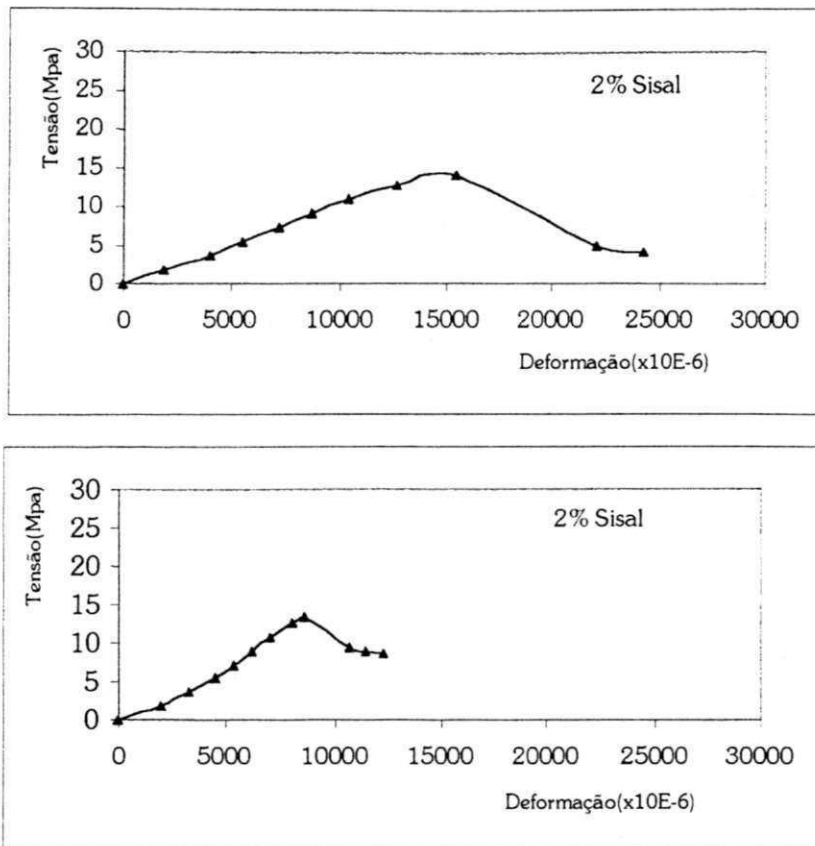


FIGURA A 3 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 2% de fibras curtas de sisal.

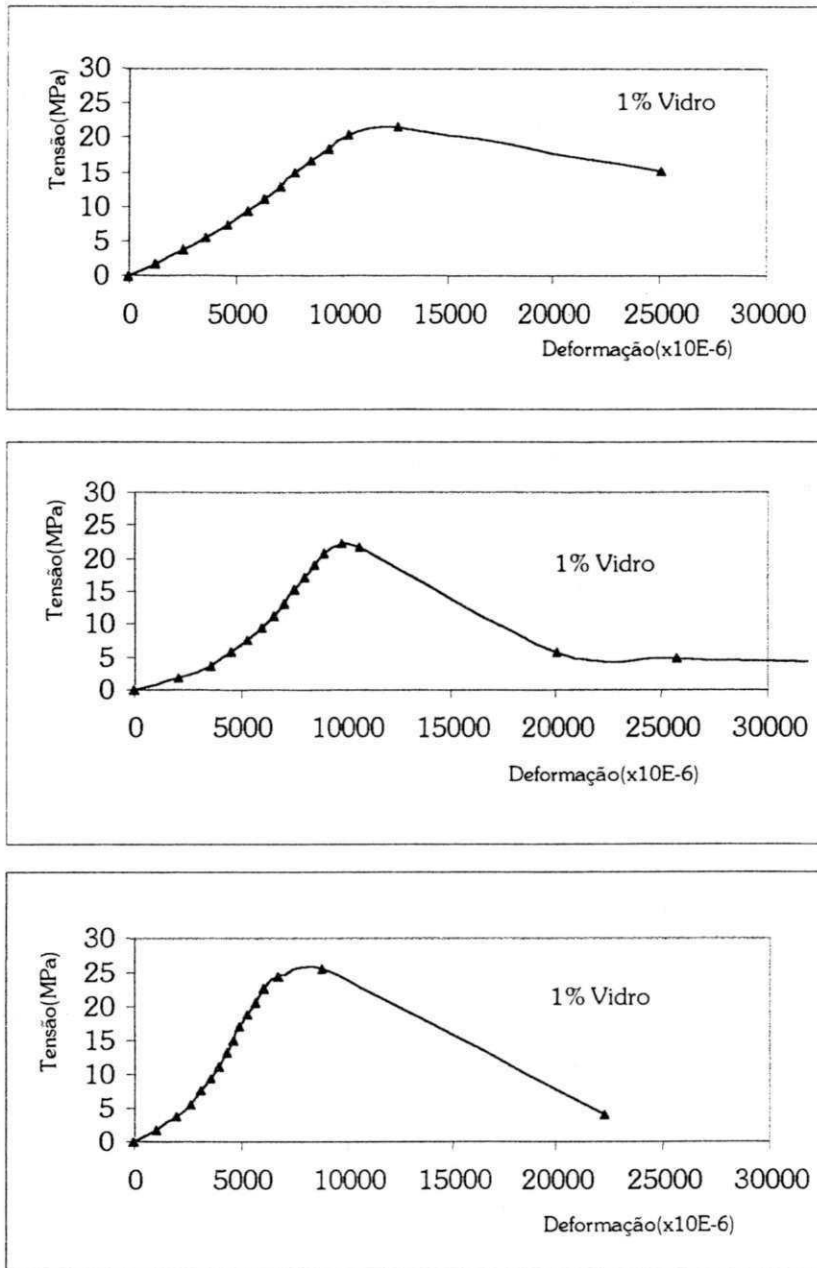


FIGURA A 4 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 1% de fibras curtas de vidro.

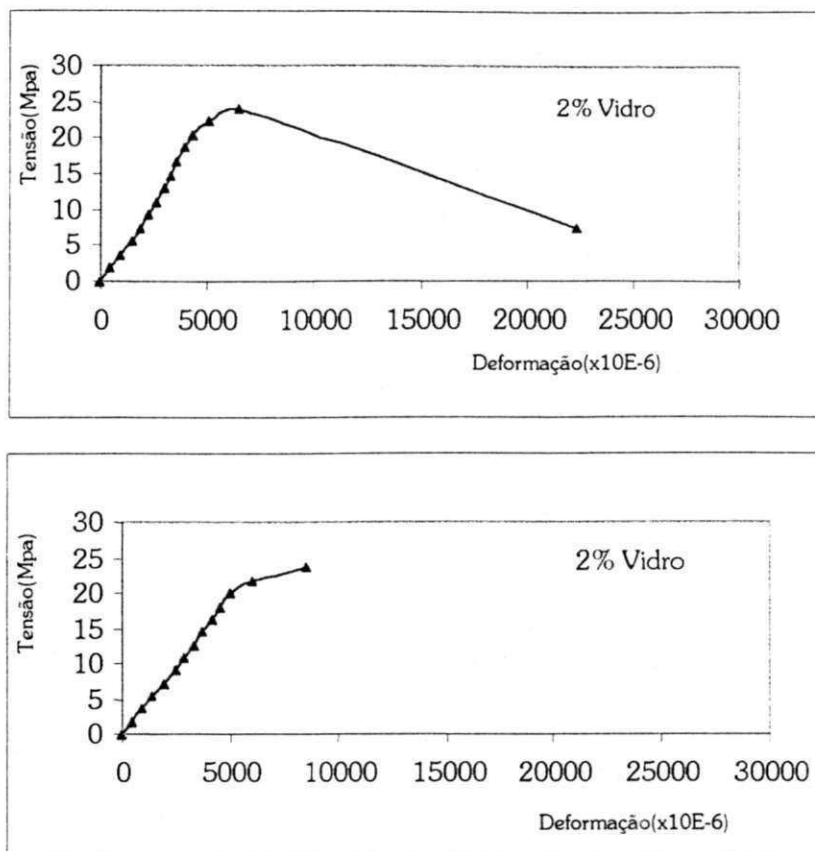


FIGURA A 5 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 2% de fibras curtas de vidro.

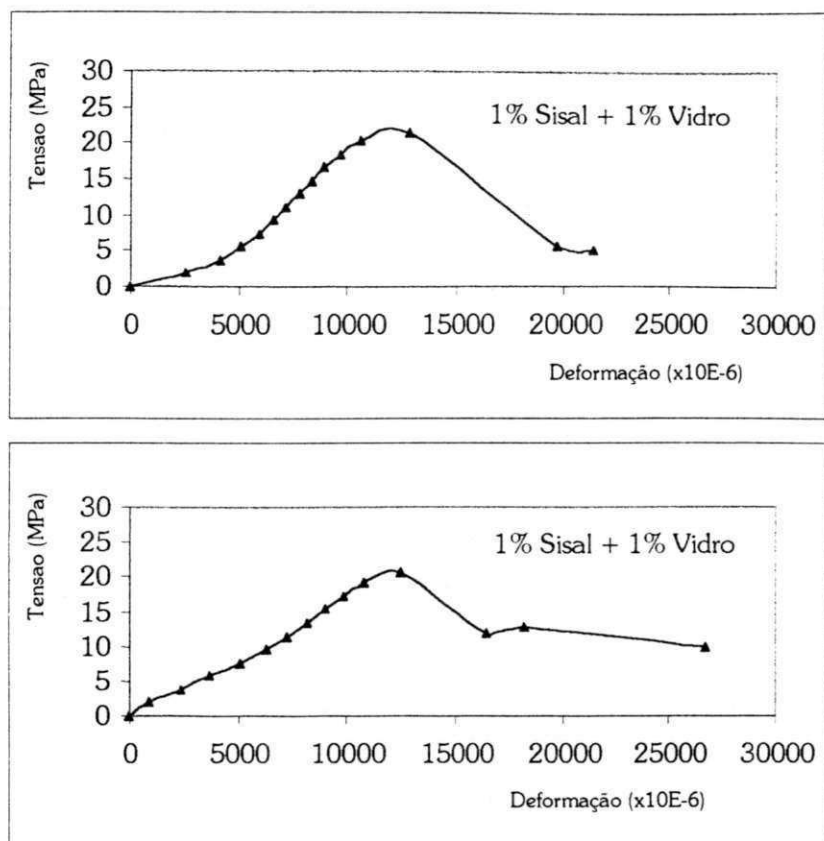


FIGURA A 6 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

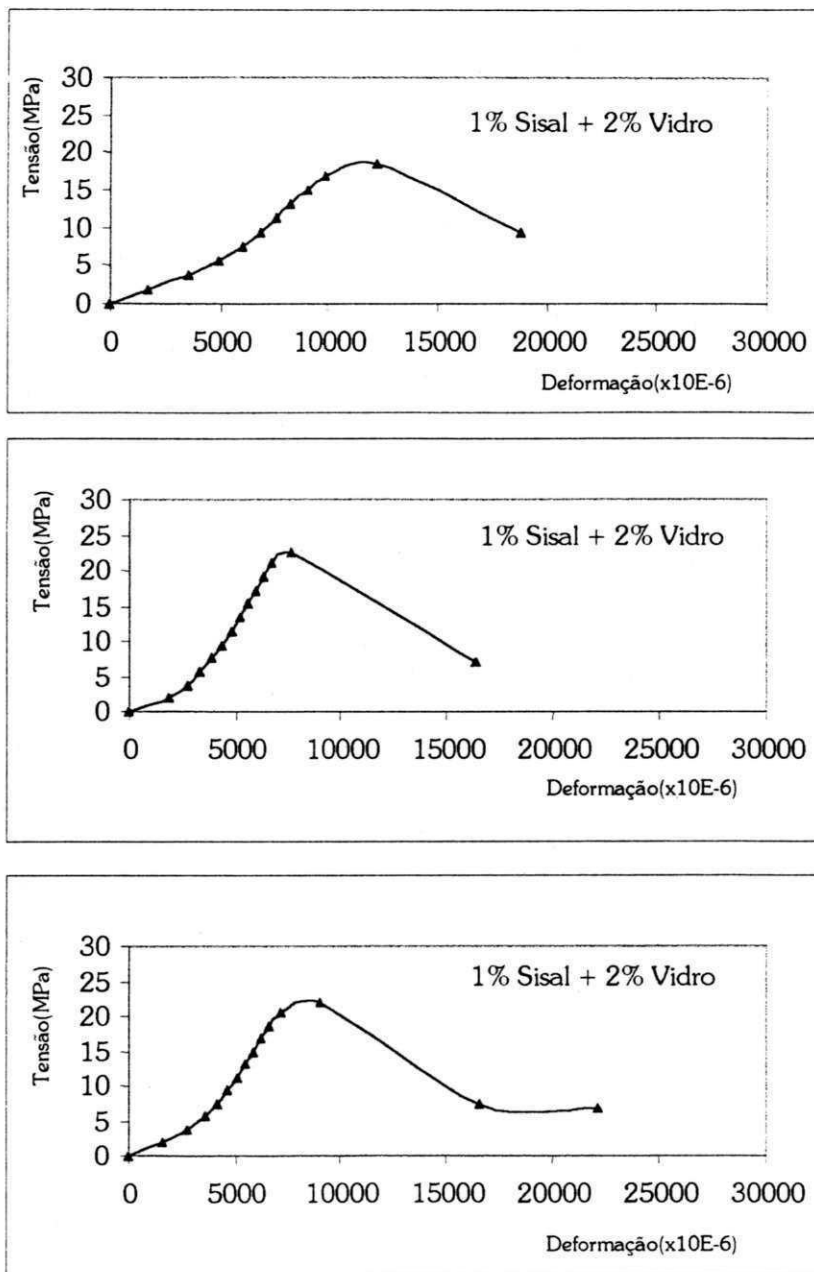


FIGURA A 7 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro.

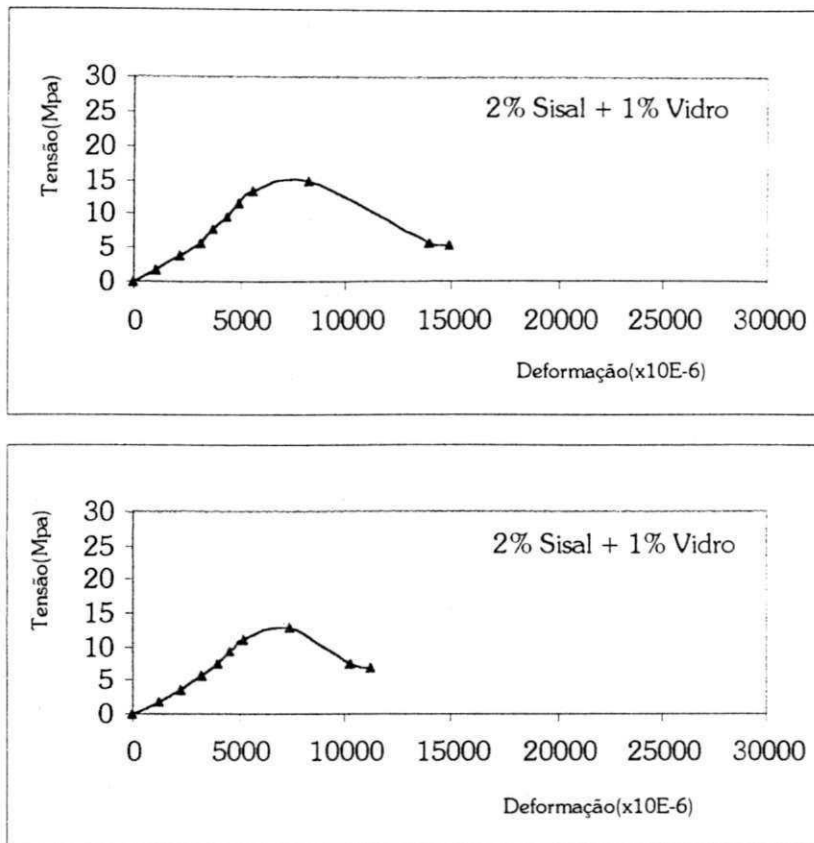


FIGURA A 8 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

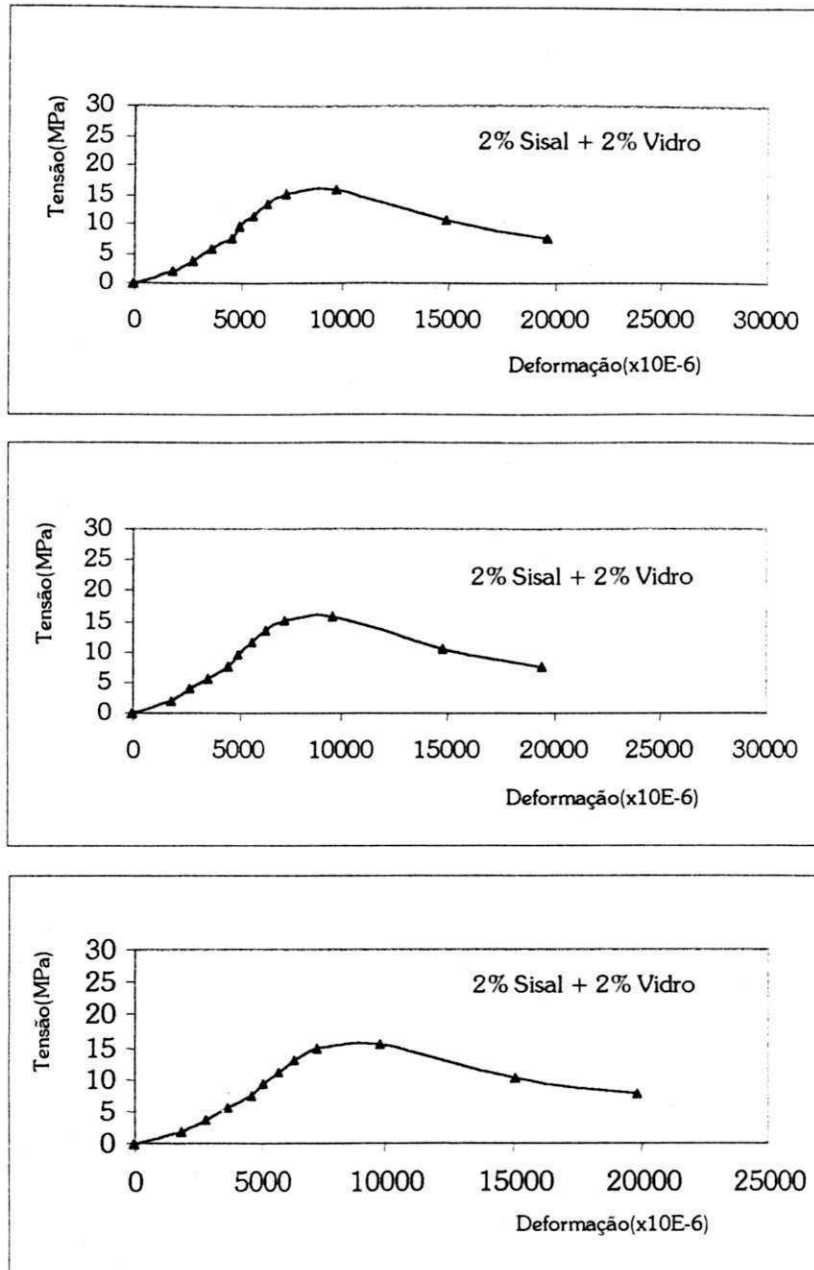


FIGURA A 9 – Curvas de tensão – deformação do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro.

ANEXO II

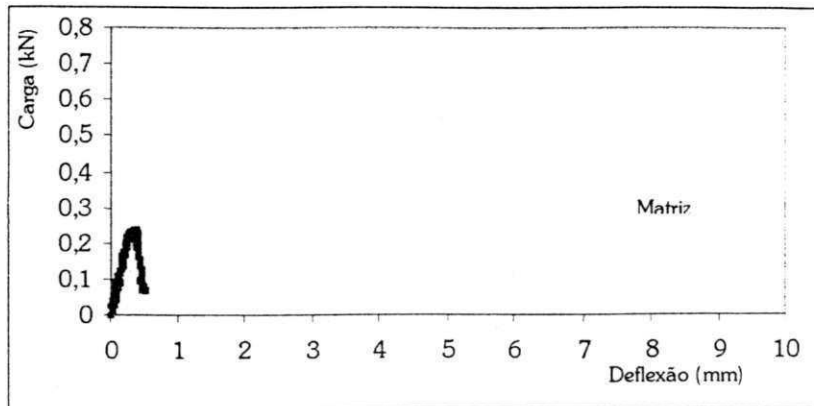


FIGURA A 10 – Curva carga – deflexão da matriz.

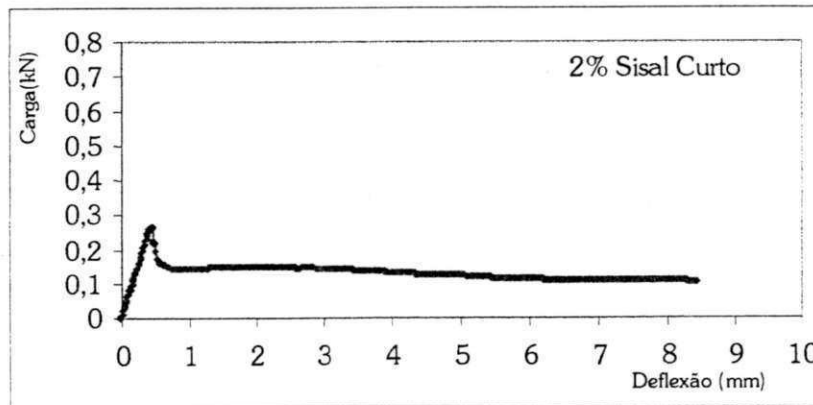
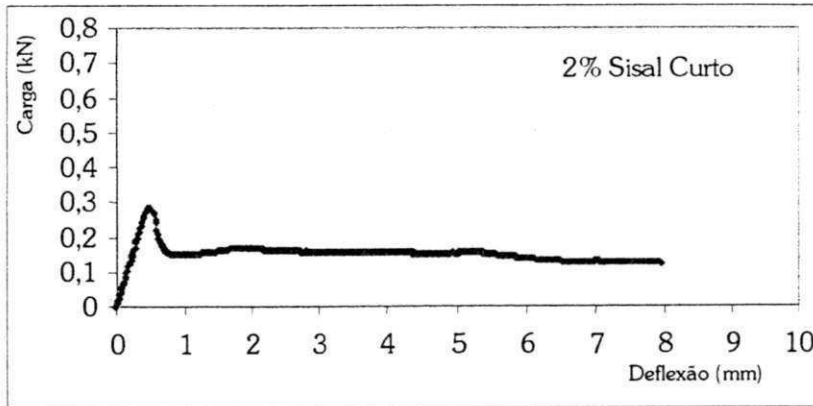
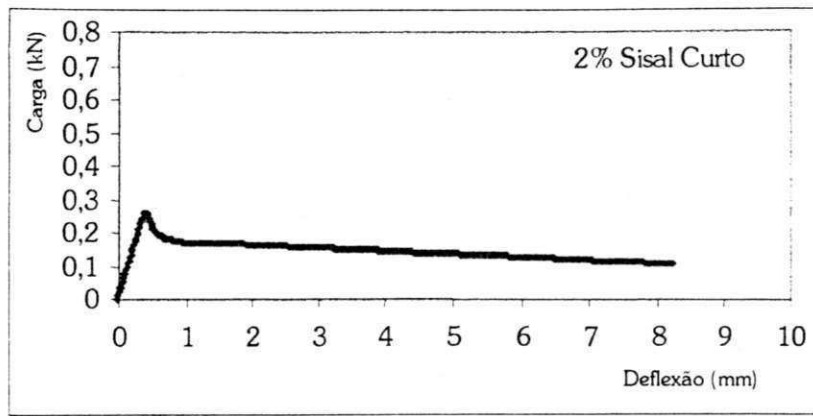


FIGURA A 11 – Curva carga – deflexão do compósito com 2 % de fibra de sisal curta

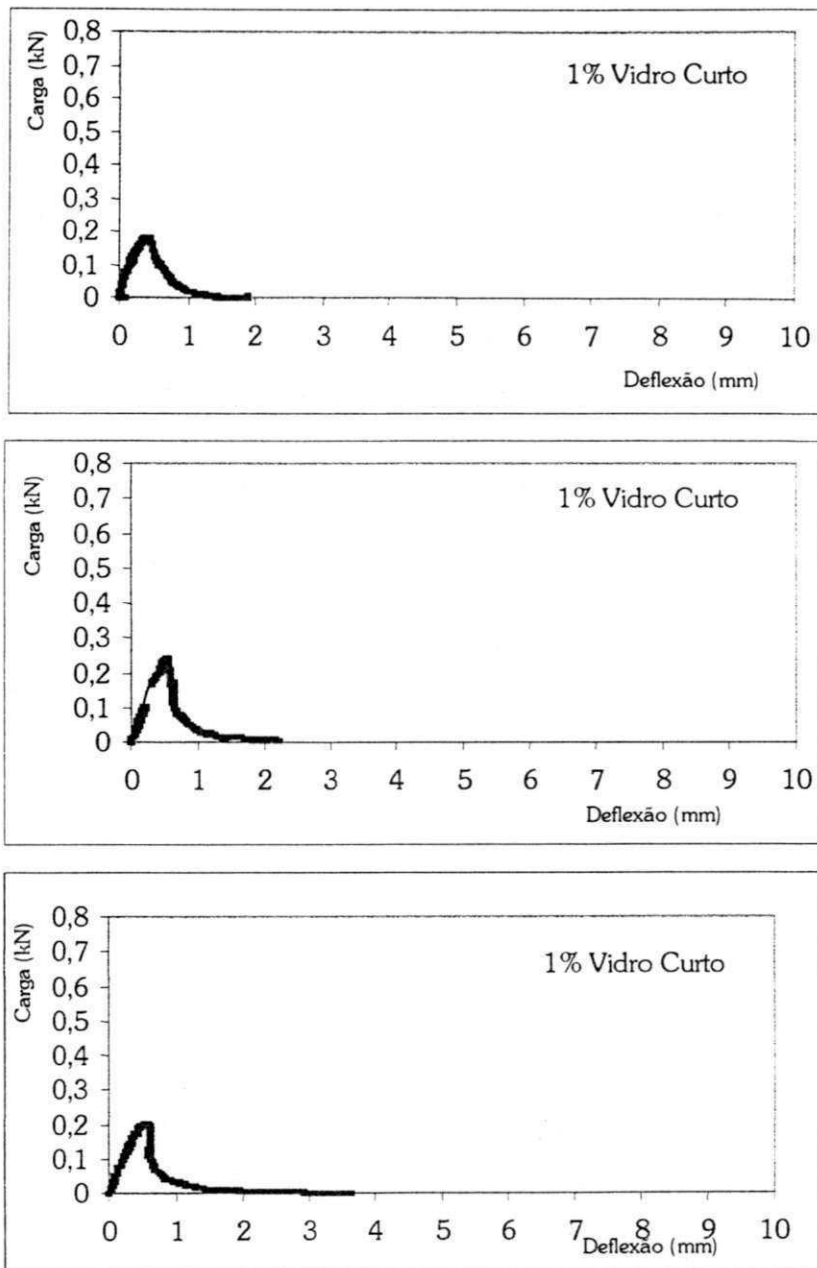


FIGURA A 12 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras curtas de vidro.

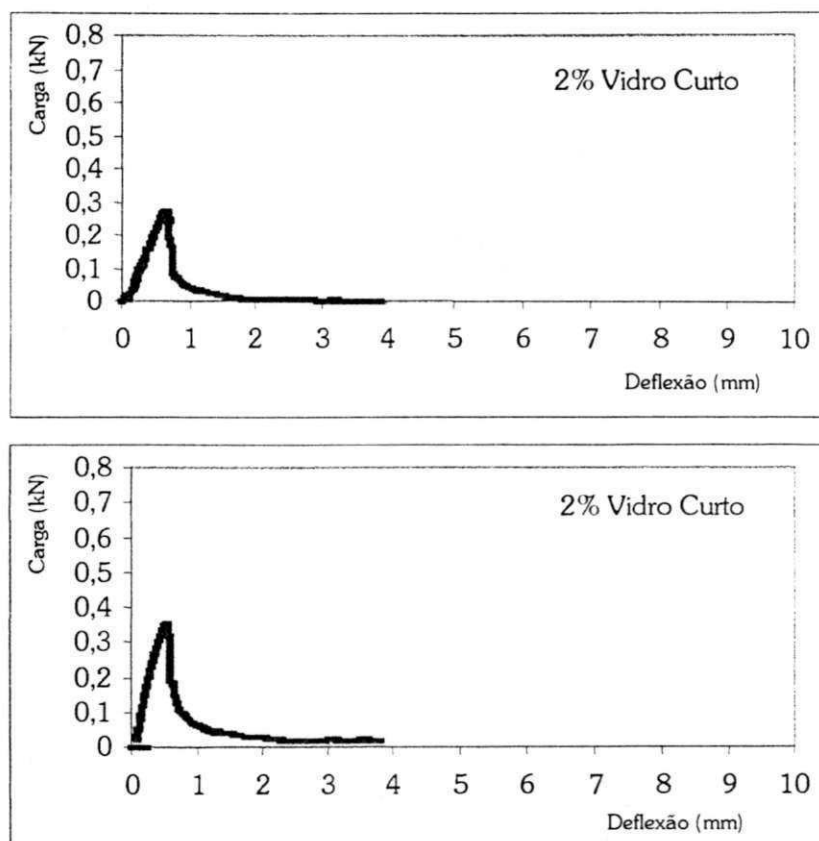


FIGURA A 13 – Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras curtas de vidro.

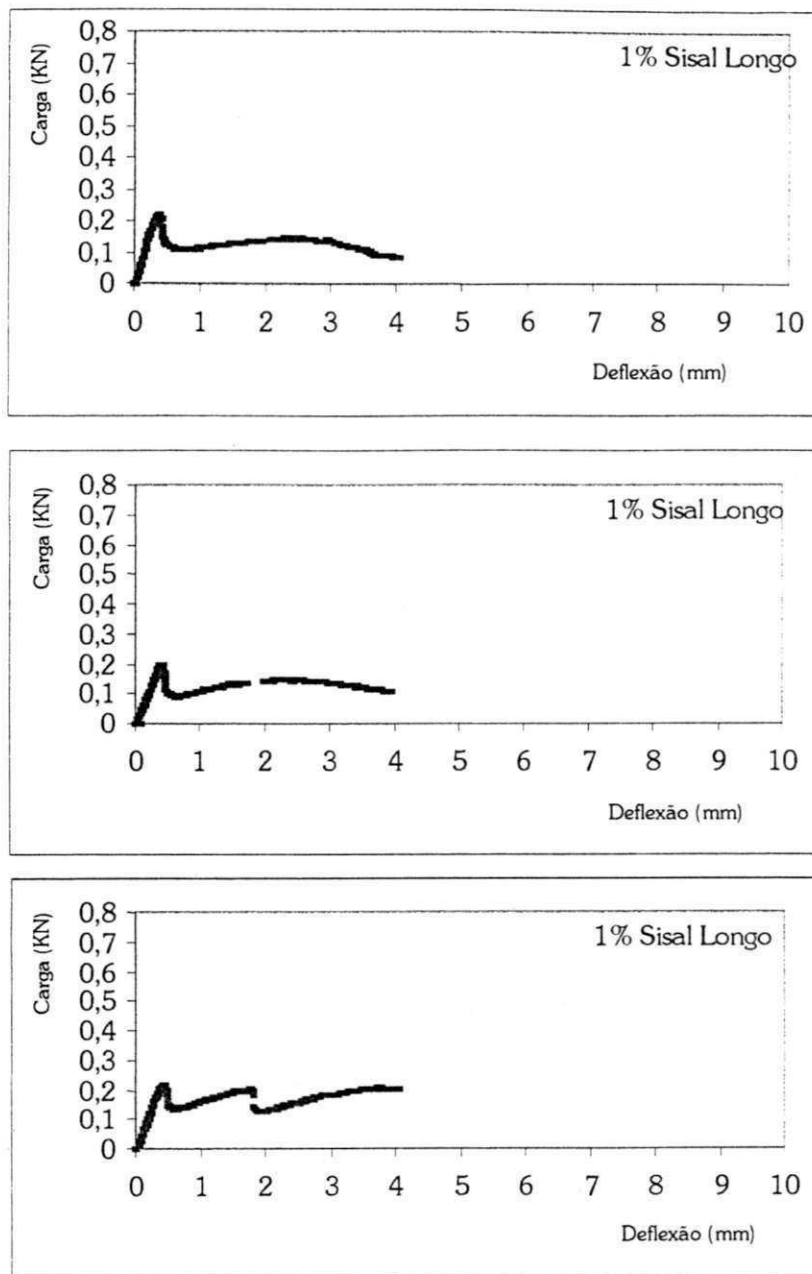


FIGURA A 14 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras de longas de sisal.

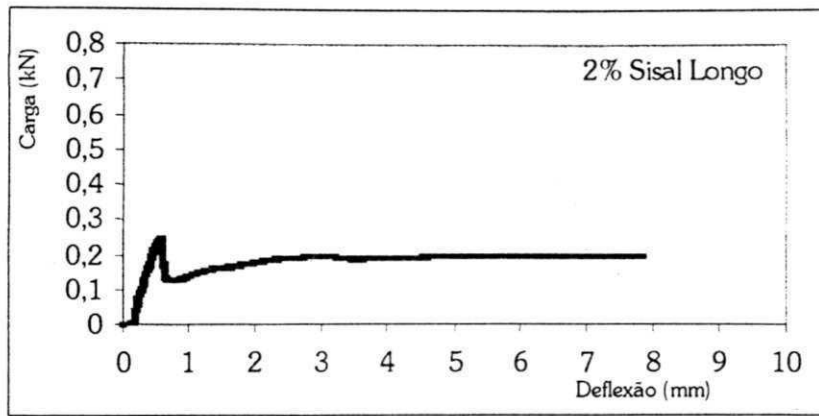


FIGURA A 15 – Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras longas de sisal.

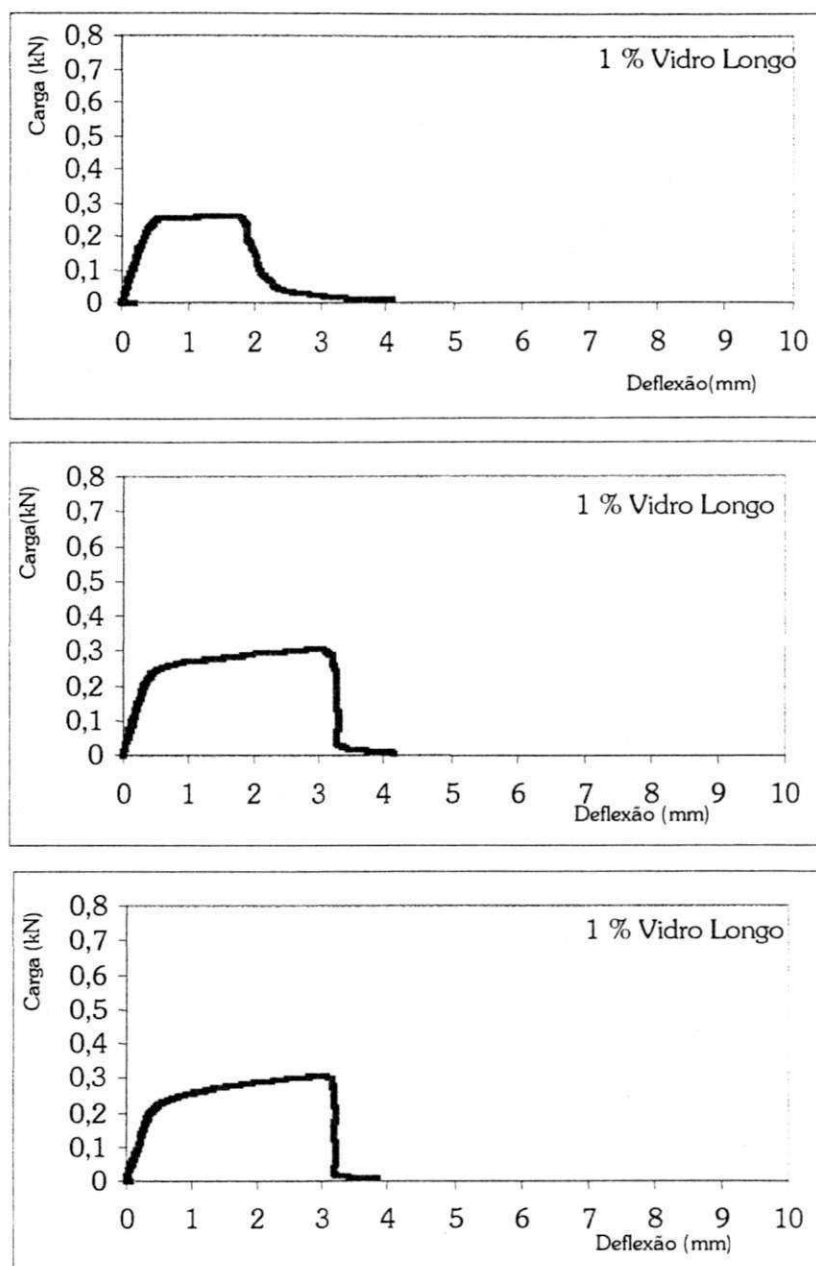


FIGURA A 16 – Curva carga – deflexão do compósito com 1 % de fibra longa de vidro.

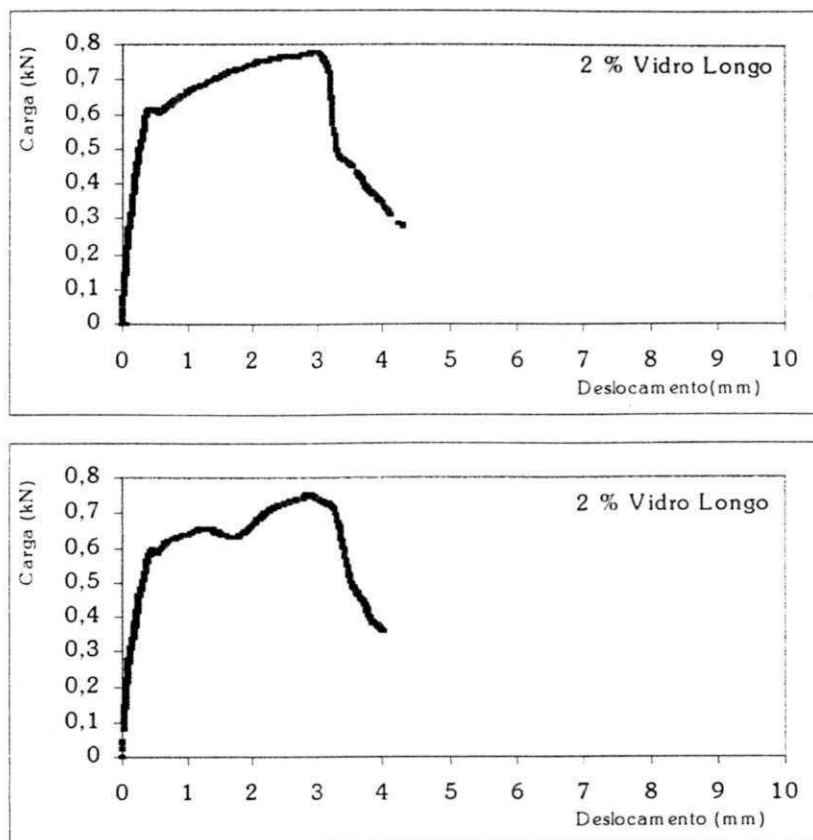


FIGURA A 17 – Curva carga – deflexão do compósito com 2 % de fibras longas de vidro.

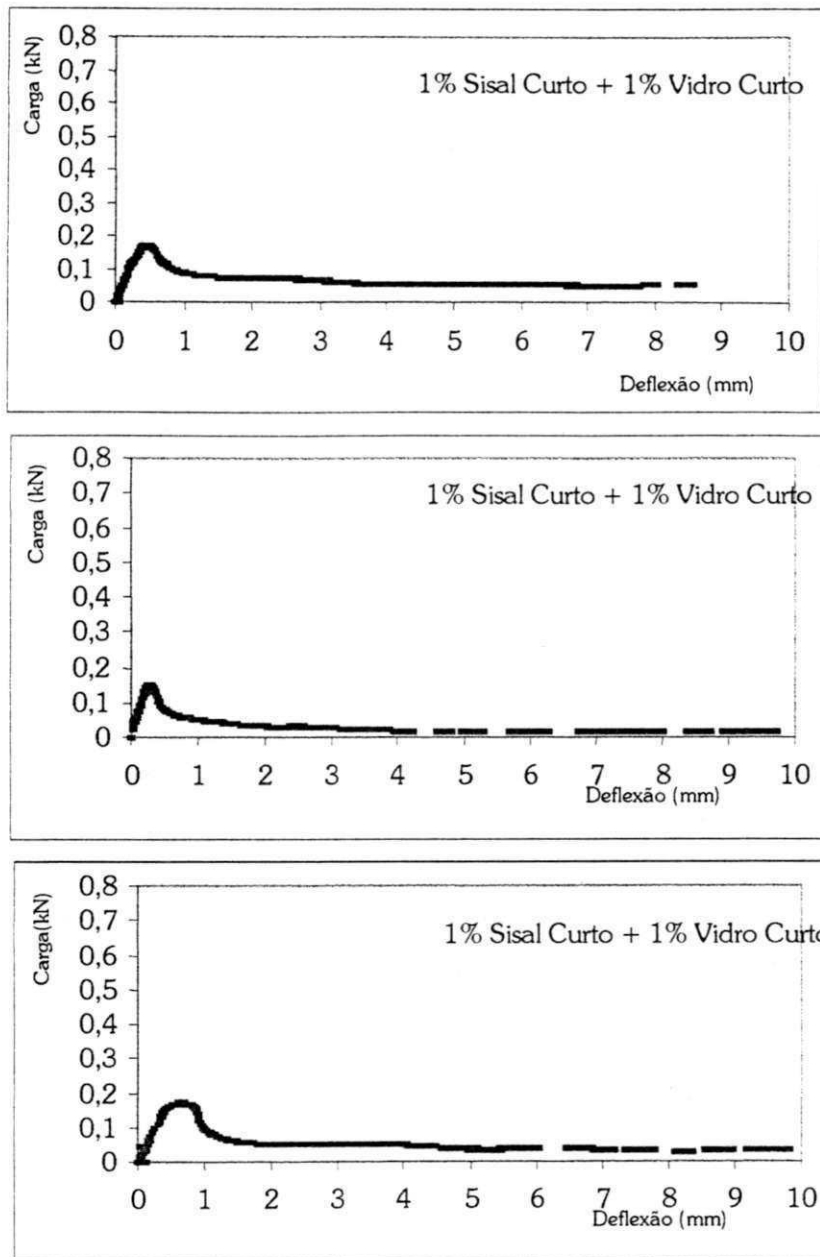


FIGURA A 18 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro

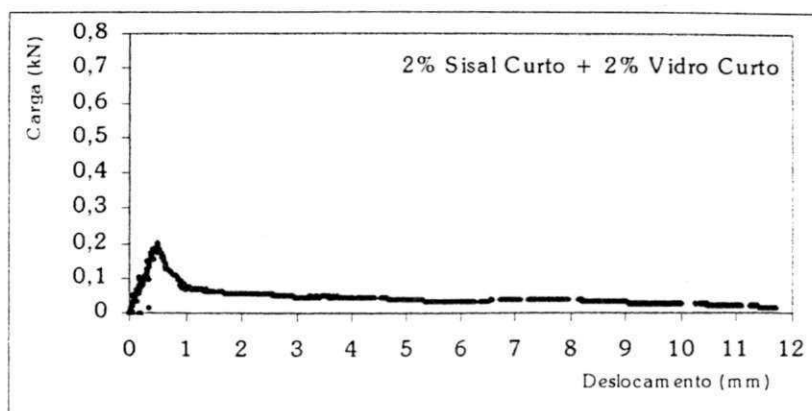


FIGURA A 19 Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro

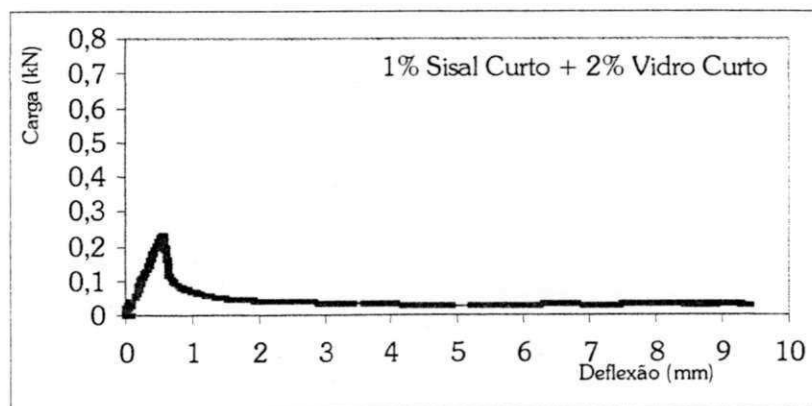
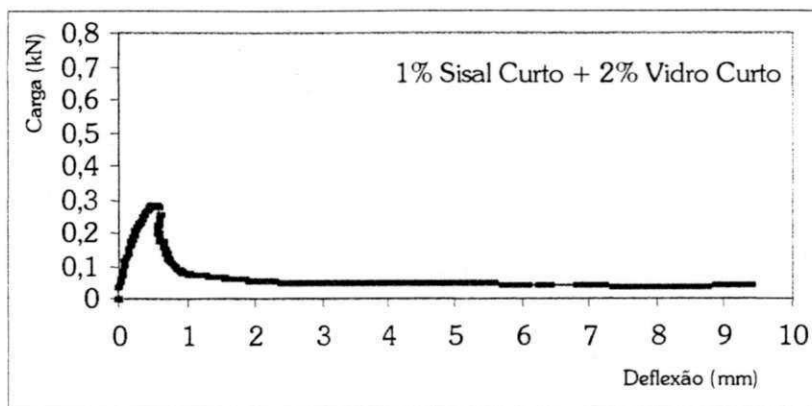


FIGURA A 20 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro

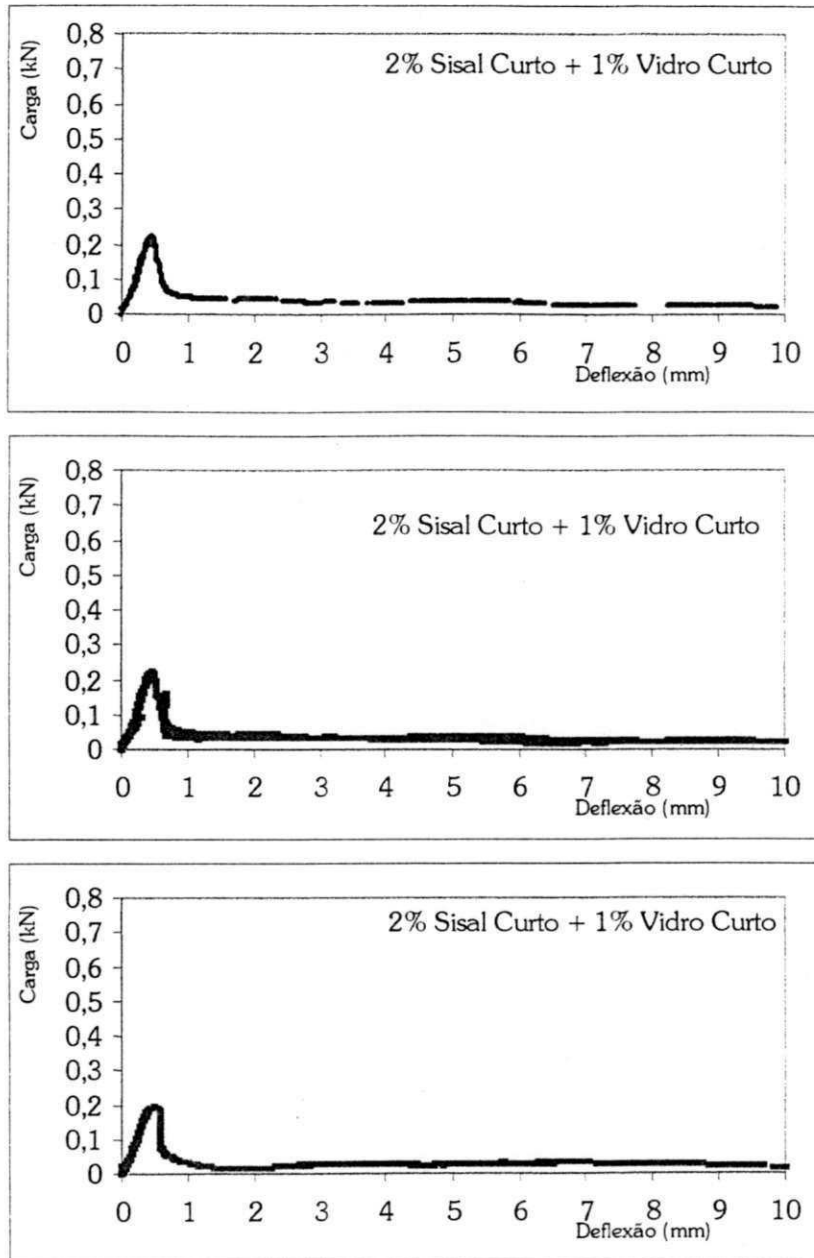


FIGURA A 21 – Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro

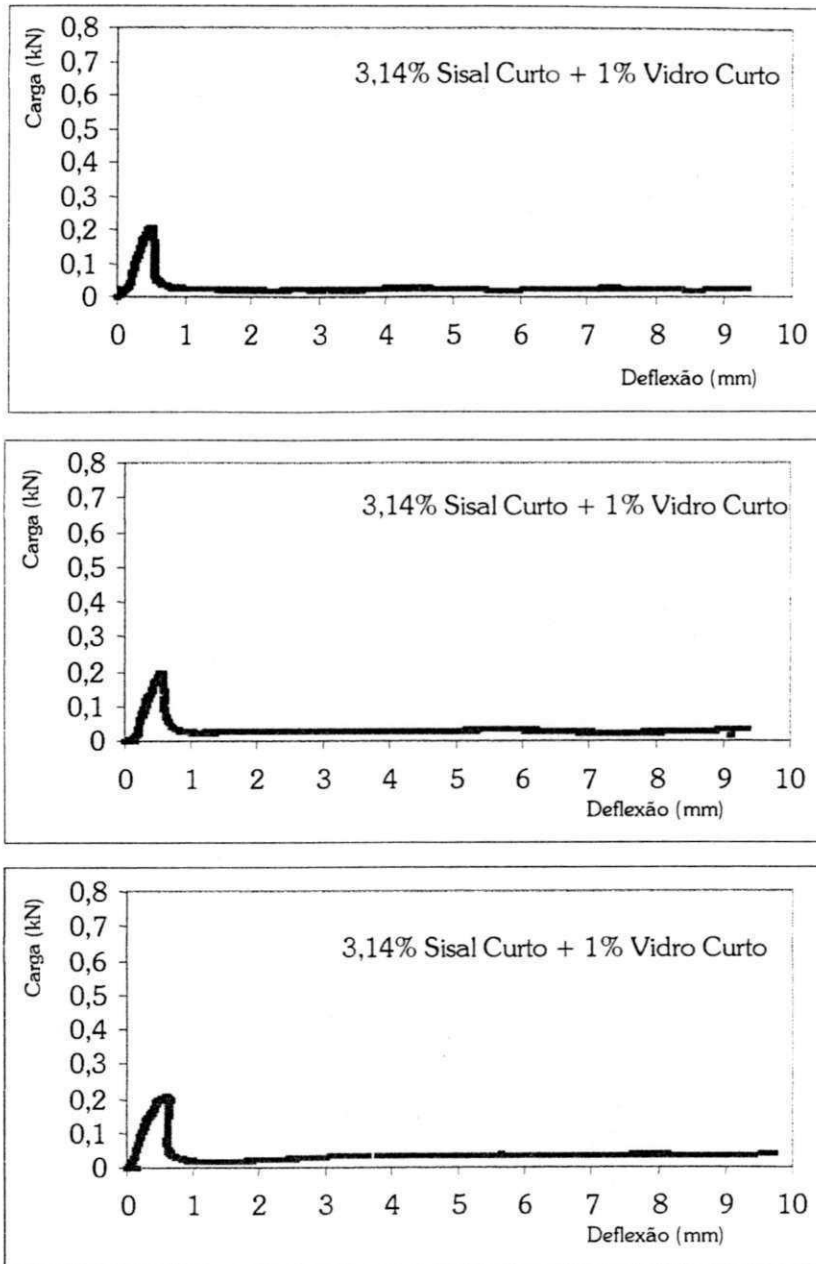


FIGURA A 22 – Curva carga – deflexão do compósito com 3,14% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

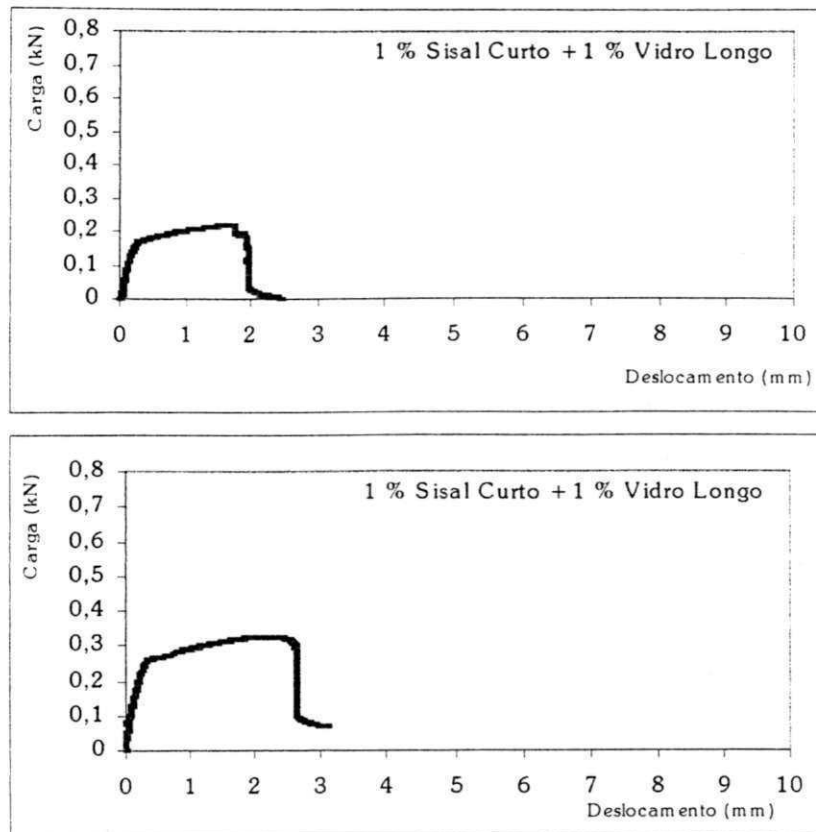


FIGURA A 23 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras longas de vidro.

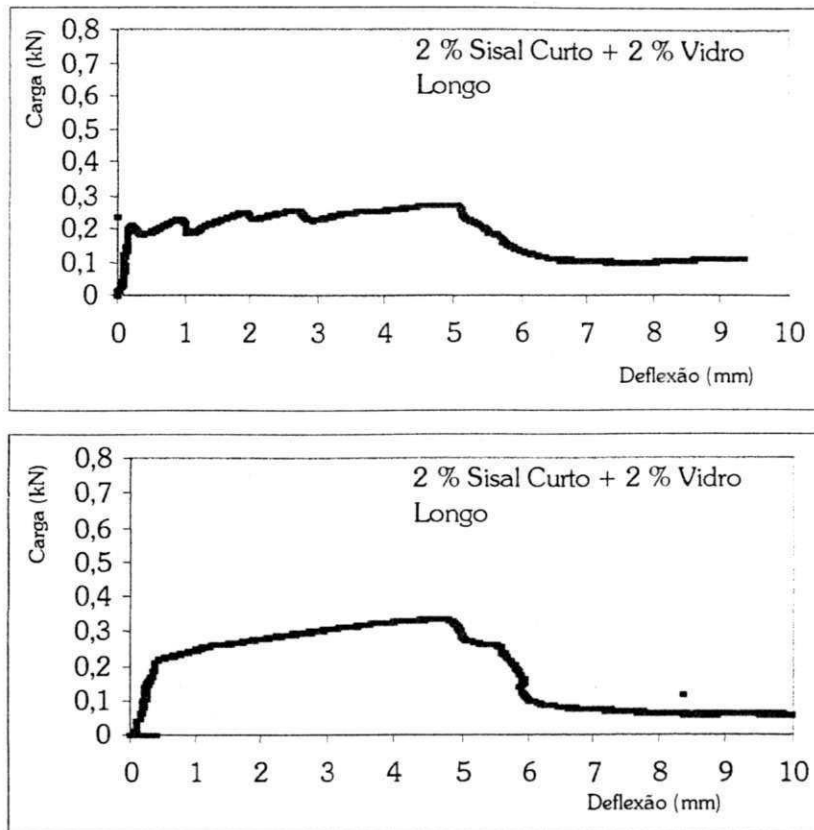


FIGURA A 24 – Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras longas de vidro.

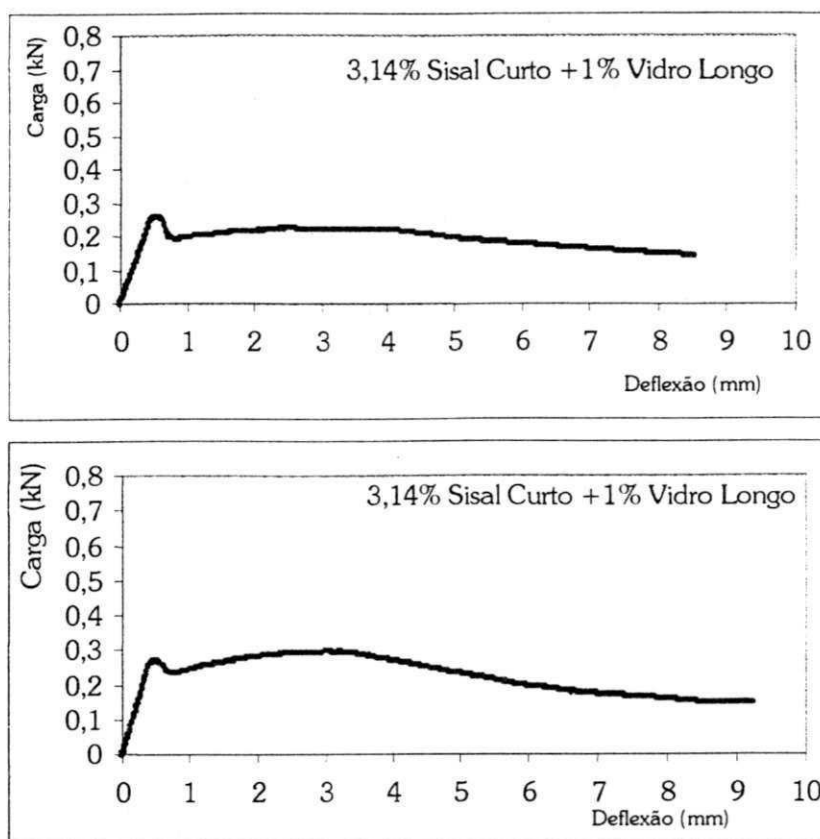


FIGURA A 25 – Curva carga – deflexão do compósito com 3,14% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras longas de vidro

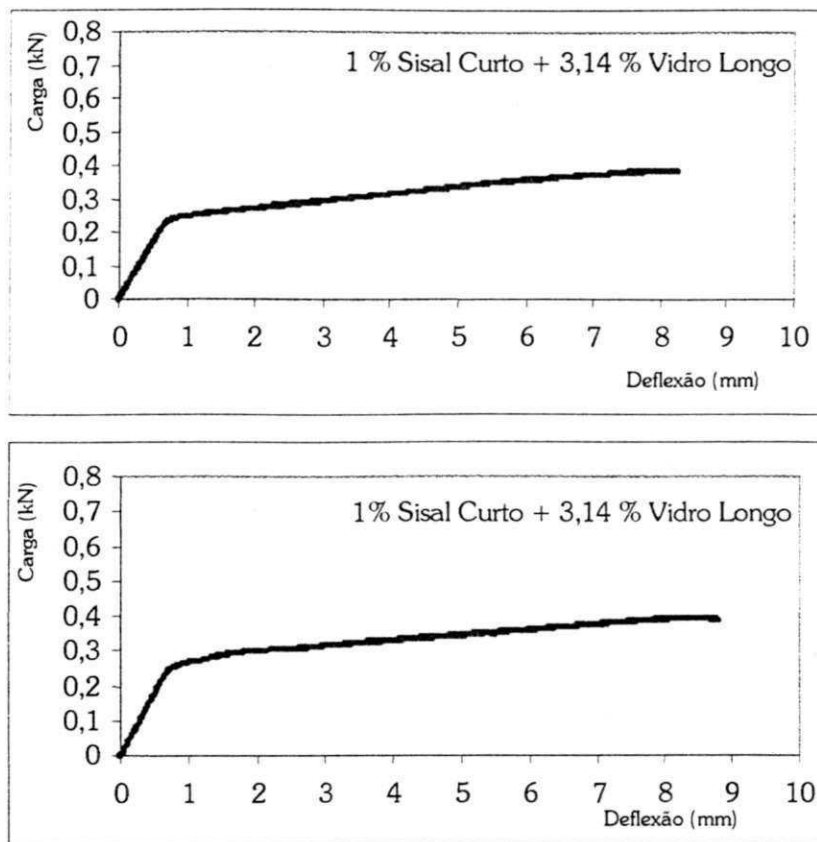


FIGURA A 26 – Curvas carga – deflexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro.

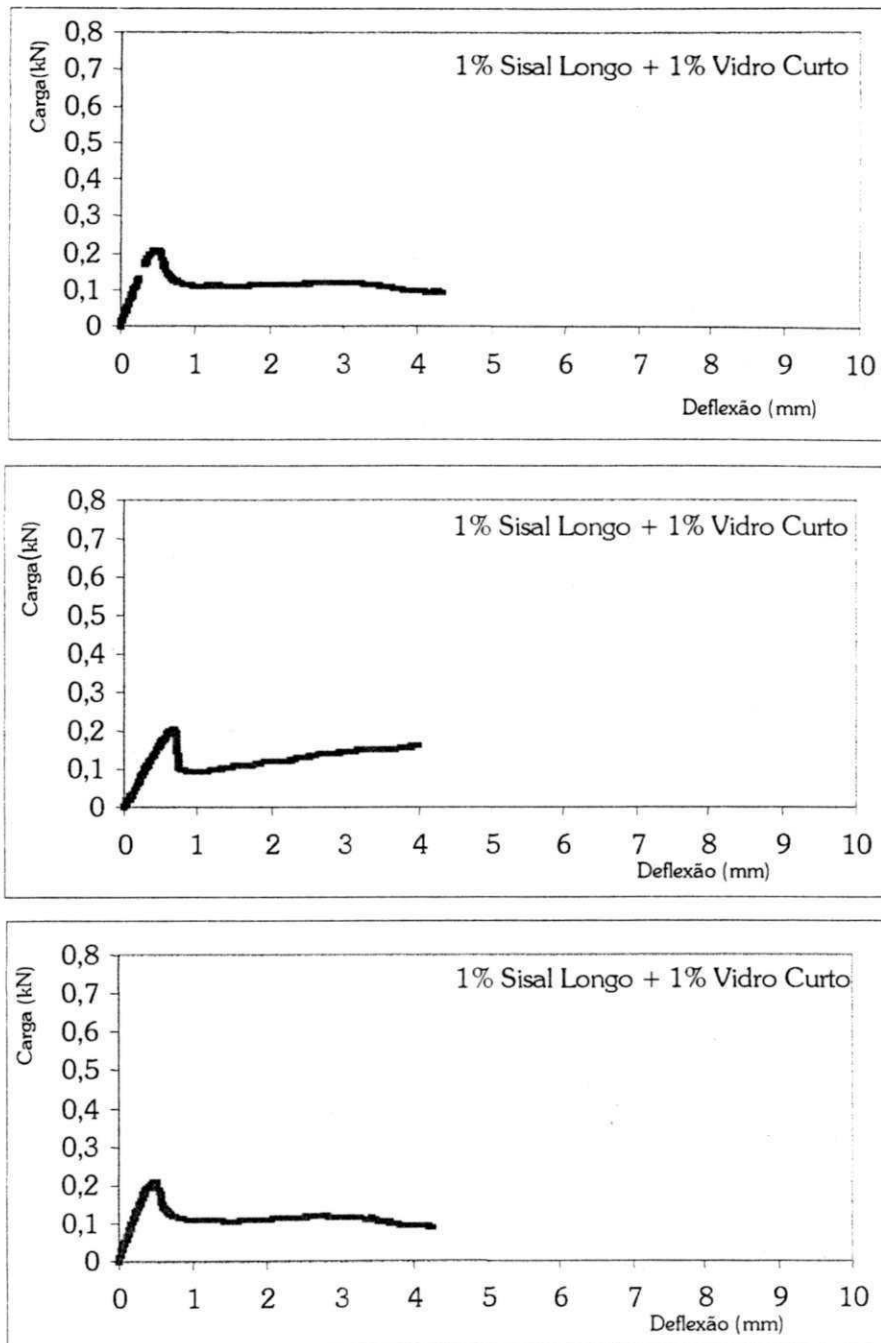


FIGURA A 27 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

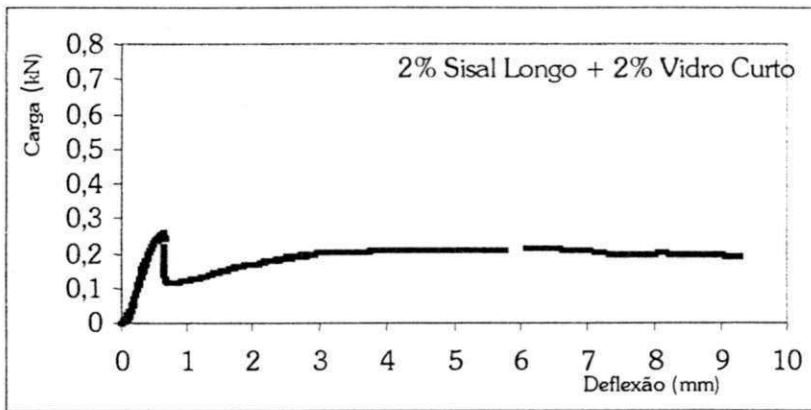
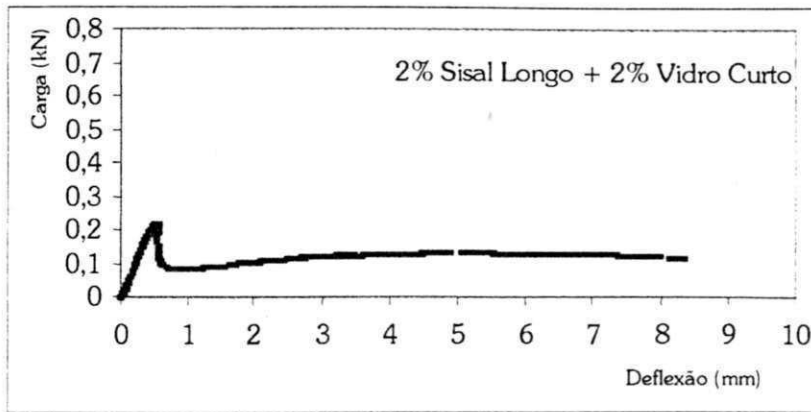


FIGURA A 28 – Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras longas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro.

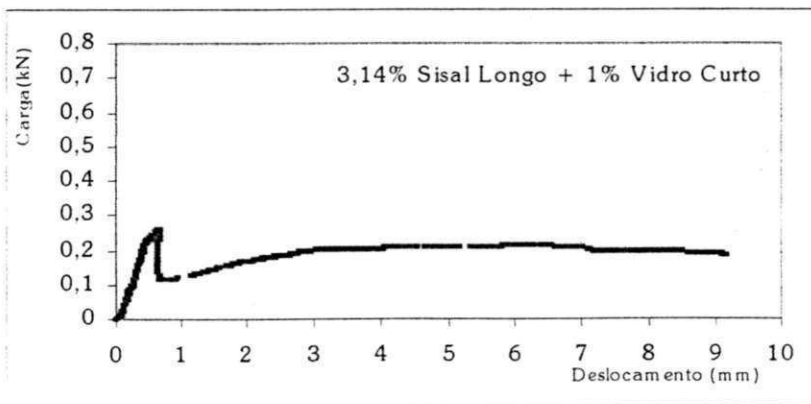


FIGURA A 29 – Curva carga – deflexão do compósito com 3,14% de fibras longas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

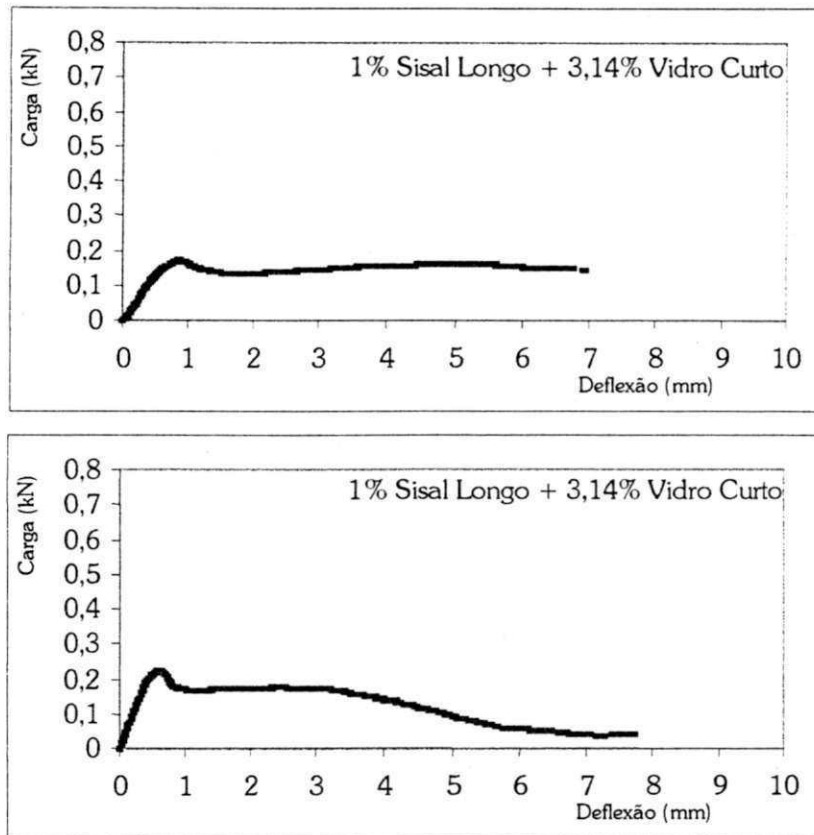


FIGURA A 30- Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro.

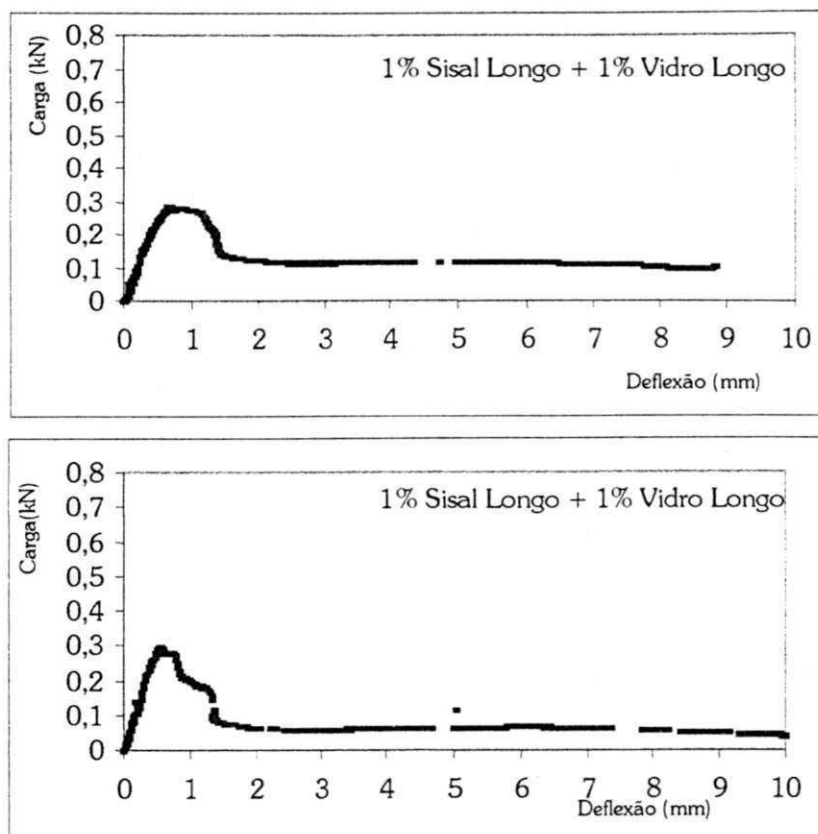


FIGURA A 31 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro.

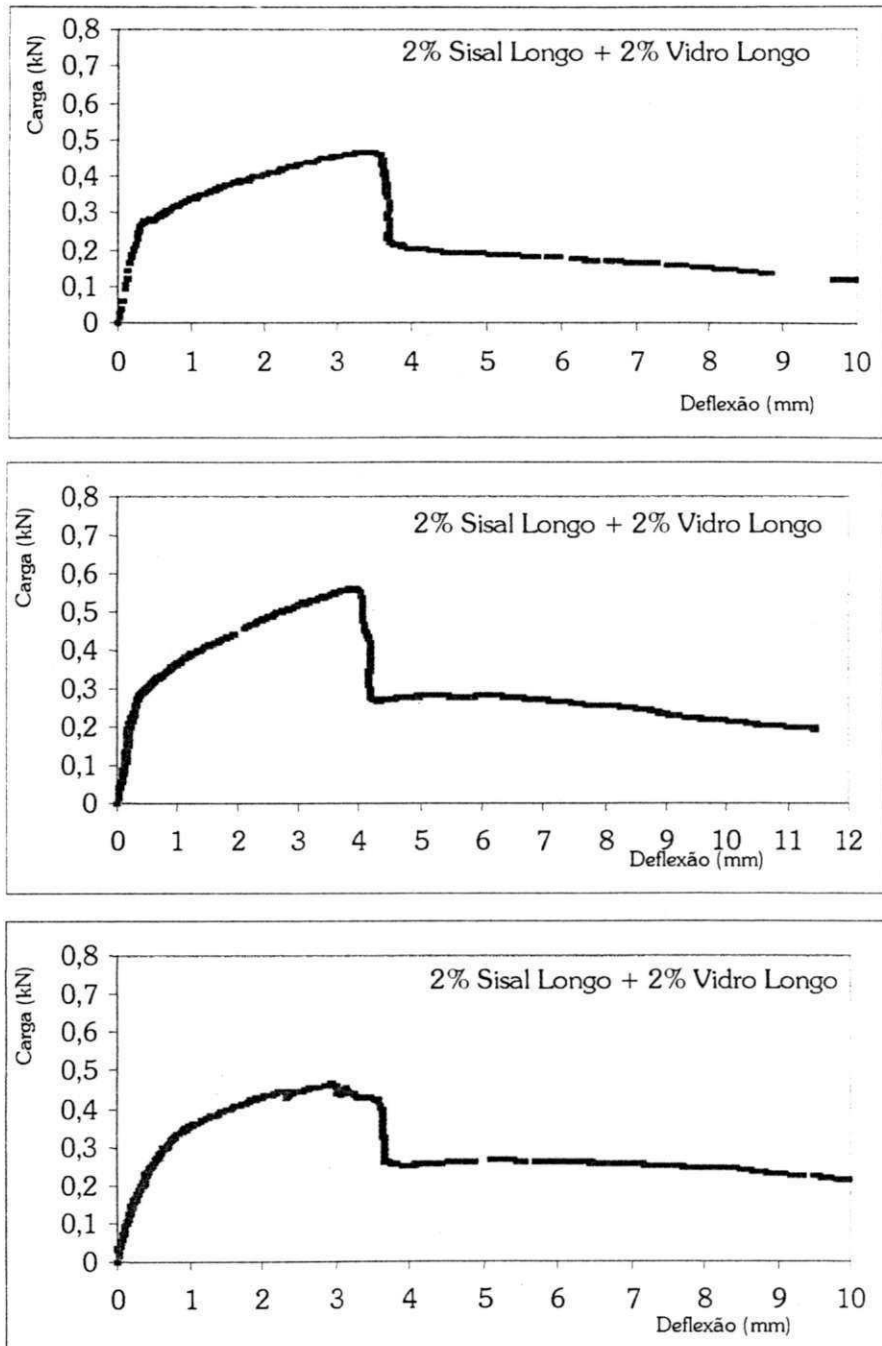


FIGURA A 32 – Curva carga – deflexão do compósito com 2% de fibras longas de sisal e 2% de fibras longas de vidro.

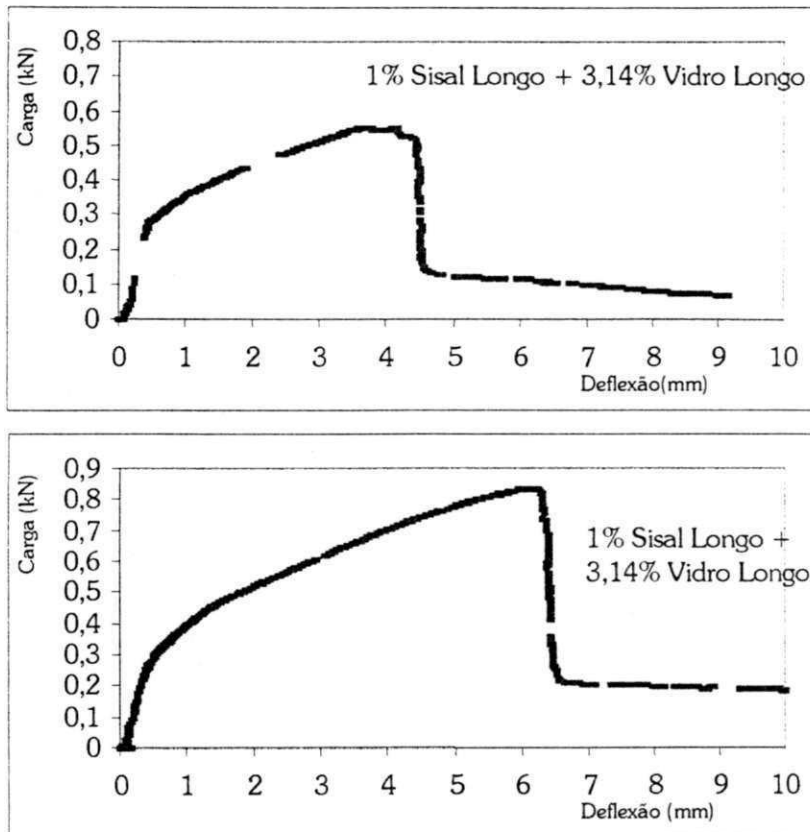


FIGURA A 33 – Curva carga – deflexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro.

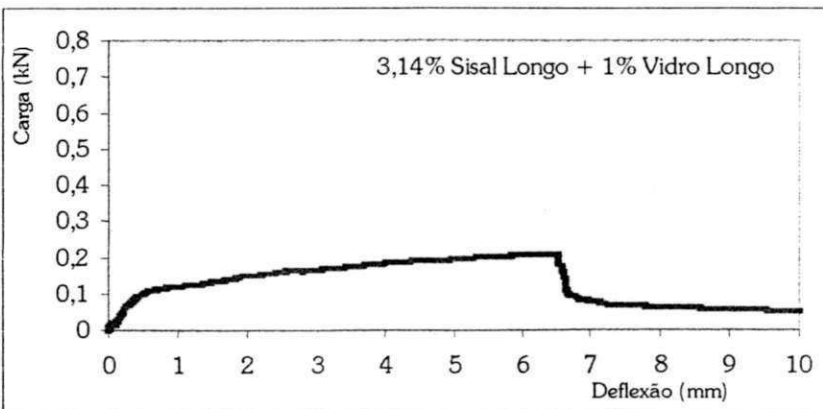
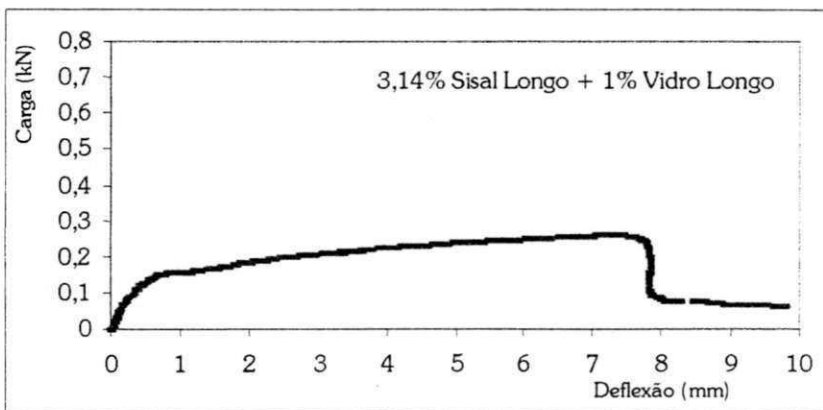
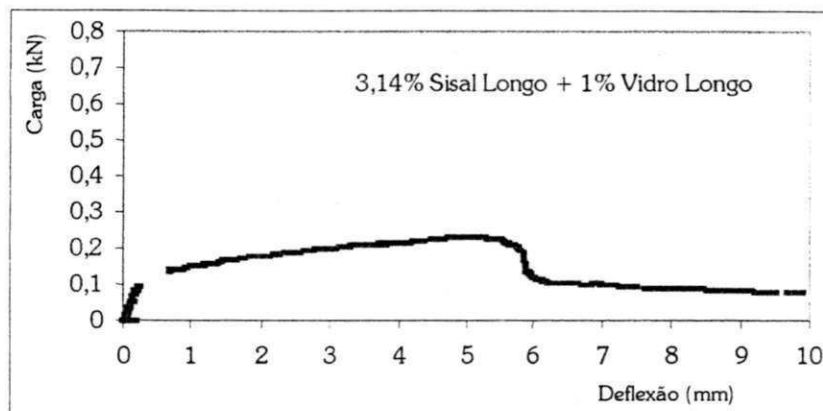
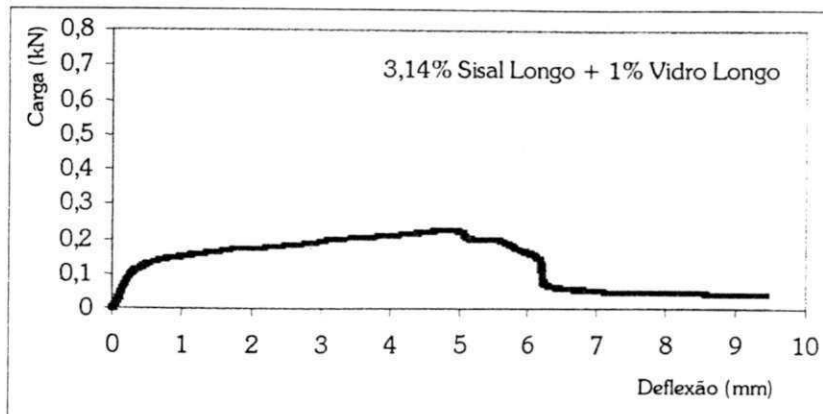


FIGURA A 34 – Curva carga – deflexão do compósito com 3,14% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro

TABELA A 1 – Resultados obtidos no ensaio de flexão da matriz

MATRIZ	Teste 1	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,210526	0,193371	0,201949	0,012131	6,006892
MaxLoad=	0,210526	0,193371	0,201949	0,012131	6,006892
FCstrength=	4,641719	4,348611	4,495165	0,207259	4,610703
MOR=	4,641719	4,348611	4,495165	0,207259	4,610703
TJCI=	0,086139	0,129768	0,107954	0,03085	28,57723
FT=	1,03782	1,594687	1,316253	0,393765	29,91559
b=	60,15	59,8	59,975	0,247487	0,412651
d=	14,4	14,3	14,35	0,070711	0,492757
P0.5mm/Pf =	0,44849	0,420791	0,43464	0,019586	4,506305
P1mm/Pf =	-	-	-	-	-
P1.4mm/Pf =	-	-	-	-	-
P2mm/Pf =	-	-	-	-	-
P2.8mm/Pf =	-	-	-	-	-

TABELA A 2 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal

2% SISAL CURTO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,262664	0,281768	0,264889	0,269774	0,010447	3,872361
MaxLoad=	0,262664	0,281768	0,264889	0,269774	0,010447	3,872361
FCstrength=	5,960481	6,196999	6,153248	6,103576	0,12584	2,061739
MOR=	5,960481	6,196999	6,153248	6,103576	0,12584	2,061739
TJCI=	0,312377	0,295175	0,273698	0,29375	0,019378	6,596905
FT=	3,873548	3,547473	3,474249	3,631757	0,212574	5,853197
b=	60,1	60,3	60,4	60,26667	0,152753	0,253461
d=	14,2	14,4	14	14,2	0,2	1,408451
P0.5mm/Pf =	0,851555	1	0,740384	0,86398	0,130253	15,07594
P1mm/Pf =	0,645348	0,531068	0,543268	0,573228	0,062755	10,9477
P1.4mm/Pf =	0,635459	0,559111	0,5625	0,58569	0,043135	7,364755
P1.8mm/Pf =	0,635132	0,596162	0,567308	0,599534	0,034037	5,677308
P2mm/Pf =	0,625398	0,596625	0,572115	0,598046	0,02667	4,459449
P2.8mm/Pf =	0,605619	0,566781	0,5625	0,5783	0,023755	4,107817
P4mm/Pf =	0,561584	0,560459	0,509616	0,543886	0,029685	5,457879
P6mm/Pf =	0,488197	0,488138	0,427885	0,468073	0,034804	7,435652
P8mm/Pf =	0,419589	0,438326	0,418269	0,425395	0,011218	2,637191

TABELA A 3 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras curtas de vidro.

1% VIDRO CURTO	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,243175	0,202829	0,223002	0,028528	12,79292
MaxLoad=	0,243175	0,202829	0,223002	0,028528	12,79292
FCstrength=	5,527426	4,878561	0,917633	18,8095	25,23913
MOR=	5,527426	4,229697	4,878561	0,917633	18,8095
TJCI=	0,143167	0,145779	0,144473	0,001846	1,278082
FT=	1,778271	1,661199	1,719735	0,082782	4,81365
b=	60	59,8	59,9	0,141421	0,236096
d=	14,2	14,85	14,525	0,459619	3,164333
P0.5mm/Pf =	0,999415	0,984441	0,021177	2,151131	18,7854
P1mm/Pf =	0,140397	0,167939	0,154168	0,019475	12,63247
P1.4mm/Pf =	0,059837	0,068702	0,06427	0,006269	9,754427
P2mm/Pf =	0,052831	0,038168	0,0455	0,010369	22,78811
P2.8mm/Pf =	0,021308	0,022901	0,022104	0,001126	5,096168

TABELA A 4 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras curtas de vidro.

2% VIDRO CURTO	Teste 2	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,34812	0,34812	-	-
MaxLoad=	0,34812	0,34812	-	-
FCstrength=	6,556343	5,791973	-	-
MOR=	6,556343	6,556343	-	-
TJCI=	0,205539	0,205539	-	-
TJCI4mm=	0,245125	0,245125	-	-
FT=	2,115316	2,115316	-	-
b=	60	60	-	-
d=	15,6	15,6	-	-
P0.5mm/Pf =	1,015272	0,89335	-	-
P1mm/Pf =	0,184051	0,184051	-	-
P1.4mm/Pf =	0,110283	0,110283	-	-
P2mm/Pf =	0,078387	0,078387	-	-
P2.8mm/Pf =	0,056342	0,056342	-	-

TABELA A 5 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal.

1% SISAL LONGO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.217033	0.197055	0.205004	0.206364	0.010058	4.873947
MaxLoad=	0.217033	0.197055	0.205004	0.206364	0.010058	4.873947
FCstrength=	4.757498	4.643599	5.374494	4.925197	0.393248	7.984411
MOR=	4.757498	4.643599	5.374494	4.925197	0.393248	7.984411
TJCI=	0.287469	0.225726	0.345618	0.286271	0.059955	20.94338
TJCI4mm=	0.562879	0.583751	0.817803	0.654811	0.14154	21.61546
FT=	3.443435	2.906676	4.951303	3.767138	1.060053	28.13948
b=	60.5	60.4	59.3	60.06667	0.665833	1.10849
d=	14.4	13.9	13.3	13.86667	0.550757	3.971806
P0.5mm/Pf =	0.564719	0.531788	0.722616	0.606374	0.102006	16.82221
P1mm/Pf =	0.517635	0.548232	0.789606	0.618491	0.148977	24.08726
P1.4mm/Pf =	0.569937	0.652597	0.917337	0.71329	0.181478	25.44243
P2mm/Pf =	0.642655	0.734171	0.637841	0.671556	0.05428	8.082655
P2.8mm/Pf =	0.636978	0.707239	0.862119	0.735445	0.11519	15.66261
P4mm/Pf =	0.379251	0.563124	1.005604	0.471187	0.130018	27.59363

TABELA A 6 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras longas de sisal.

2% SISAL LONGO	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.232247	0.232247	-	-
MaxLoad=	0.232247	0.232247	-	-
FCstrength=	6.599706	6.599706	-	-
MOR=	6.599706	6.599706	-	-
TJCI=	0.222769	0.222769	-	-
TJCI4mm=	1.729014	1.729014	-	-
FT=	3.459209	3.459209	-	-
b=	60	60	-	-
d=	12,7	12,7	-	-
P0.5mm/Pf =	1.020001	1.020001	-	-
P1mm/Pf =	0.600001	0.600001	-	-
P1.4mm/Pf =	0.693334	0.693334	-	-
P2mm/Pf =	0.773334	0.773334	-	-
P2.8mm/Pf =	0.840001	0.840001	-	-
P4mm/Pf =	1.005604	1.005604	-	-

TABELA A 7 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras longas de vidro.

1% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,246954	0,246382	0,220829	0,238055	0,014921	6,267791
MaxLoad=	0,262371	0,305828	0,305239	0,291146	0,024921	8,559753
FCstrength=	5,516717	5,445839	4,947006	5,303187	0,310491	5,854807
MOR=	5,861118	6,759788	6,837956	6,486287	0,542822	8,368757
TJCI=	0,54846	0,602087	0,610451	0,586999	0,033637	5,730373
TJCI4mm=	0,642246	1,056214	1,085145	0,927868	0,247779	26,70408
FT=	6,695111	7,272178	7,472845	7,146711	0,403762	5,649622
b=	60,2	60	59,2	59,8	0,52915	0,884867
d=	14,3	14,4	14,4	14,36667	0,057735	0,401868
P0.5mm/Pf =	0,994997	0,989883	1,013917	0,999599	0,012661	1,266563
P1mm/Pf =	1,027057	1,105048	1,164735	1,098947	0,069042	6,282524
P1.4mm/Pf =	1,066185	1,13177	1,232071	1,143342	0,083546	7,307216
P2mm/Pf =	0,580781	1,189512	1,299798	1,023364	0,387234	37,83933
P2.8mm/Pf =	0,113721	1,235489	1,381753	0,910321	0,693741	76,20846
P4mm/Pf =	0,04354	0,041262	0,048732	0,044512	0,003829	8,601276

TABELA A 8 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras longas de vidro.

2% VIDRO LONGO	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,617033	0,587919	0,611296	0,008418	1,377031
MaxLoad=	0,765231	0,750865	0,757551	0,006133	0,809586
FCstrength=	11,37853	9,947359	10,90309	0,003429	0,03145
MOR=	14,11141	12,70435	13,503	0,2957	2,189885
TJCI=	1,440816	1,50335	1,485708	0,051012	3,433531
TJCI4mm=	2,848322	4,342011	3,585971	0,508591	14,1828
FT=	14,51895	8,75349	12,74539	0,3145	2,46756
b=	60,5	59,7	60,1	0,282843	0,47062
d=	15,7	16,5	16,03333	0,141421	0,882046
P0.5mm/Pf =	1	0,992061	0,977924	0,041216	4,214653
P1mm/Pf =	1,081233	1,087649	1,041643	0,088519	8,498032
P1.4mm/Pf =	1,139319	1,102552	1,075185	0,110051	10,23552
P2mm/Pf =	1,211573	1,137995	1,122554	0,13681	12,18741
P2.8mm/Pf =	1,253043	1,272137	1,219012	0,085692	7,02964

TABELA A 9 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro.

2% SISAL CURTO E 2% VIDRO CURTO	Teste 2	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.196897	0.196897	-	-
MaxLoad=	0.196897	0.196897	-	-
FCstrength=	3.708263	3.266855	-	-
MOR=	3.708263	3.708263	-	-
TJCI=	0.193681	0.193681	-	-
TJCI 4mm=	0.306559	0.226601	-	-
FT=	4.50	4.50	-	-
b=	60	60	-	-
d=	15.6	15.6	-	-
P0.5mm/Pf =	0.96788	0.48394	-	-
P1mm/Pf =	0.361112	0.361112	-	-
P1.4mm/Pf =	0.309768	0.309768	-	-
P2mm/Pf =	0.288704	0.288662	-	-
P2.8mm/Pf =	0.249736	0.249736	-	-

TABELA A 10 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro.

1% SISAL CURTO E 2% VIDRO CURTO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Media	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.285327	0.229966	0.252247	0.255847	0.027855	10.88744
MaxLoad=	0.285327	0.229966	0.252247	0.255847	0.027855	10.88744
FCstrength=	5.164239	4.240747	5.650818	5.018601	0.716228	14.27147
MOR=	5.164239	4.240747	5.650818	5.018601	0.716228	14.27147
TJCI=	0.251167	0.176701	0.185094	0.204321	0.040787	19.96204
TJCI4mm=	0.362964	0.262738	0.254808	0.293503	0.060286	20.53997
FT=	2.484135	1.780596	2.265831	2.176854	0.360111	16.5427
b=	60.1	60.5	59.2	59.93333	0.665833	1.110956
d=	15.9	15.7	14.4	15.33333	0.814453	5.311649
P0.5mm/Pf =	0.999897	0.985946	0.641063	0.875635	0.203265	23.21349
P1mm/Pf =	0.265272	0.293735	0.21302	0.257342	0.040938	15.90791
P1.4mm/Pf =	0.239278	0.219829	0.159221	0.206109	0.041755	20.25852
P2mm/Pf =	0.197619	0.18144	0.127082	0.168714	0.03695	21.90116
P2.8mm/Pf =	0.177851	0.171465	0.124022	0.157779	0.029409	18.63921

TABELA A11- Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

2% SISAL CURTO E 1% VIDRO CURTO	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,225802	0,225802	0,196467	0,216023	0,016937	7,840193
MaxLoad=	0,225802	0,225802	0,196467	0,216023	0,016937	7,840193
FCstrength=	4,320619	5,077931	4,275738	4,558096	0,450749	9,888984
MOR=	4,320619	5,077931	4,275738	4,558096	0,450749	9,888984
TJCI=	0,168941	0,170595	0,110743	0,150093	0,034088	22,71138
TJCI4mm=	0,254318	0,254601	0,163891	0,22427	0,05229	23,31568
FT=	1,766455	2,096403	1,317004	1,726621	0,391223	22,65833
b=	60,6	59,8	60,1	60,16667	0,404145	0,671709
d=	15,4	14,3	14,5	14,73333	0,585947	3,977013
P0.5mm/Pf =	0,869802	0	1	0,623267	0,543677	87,23012
P1mm/Pf =	0,21973	0,143362	0,146604	0,169899	0,043186	25,4184
P1.4mm/Pf =	0,206214	0,144527	0,096176	0,148972	0,055154	37,02292
P2mm/Pf =	0,193258	0,14632	0,135887	0,158488	0,03056	19,28236
P2.8mm/Pf =	0,166387	0,161243	0,131656	0,153095	0,018744	12,24341

TABELA A 12 - Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 3,14% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

3,14% SISAL CURTO E 1% VIDRO CURTO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,204388	0,197677	0,200908	0,200991	0,003356	1,66991
MaxLoad=	0,204388	0,197677	0,200908	0,200991	0,003356	1,66991
FCstrength=	4,291047	4,111818	4,175662	4,192842	0,090842	2,16658
MOR=	4,291047	4,111818	4,175662	4,192842	0,090842	2,16658
TJCI=	0,105802	0,142544	0,473639	0,240662	0,202599	84,1840
TJCI 4mm=	1,213815	1,620225	5,379285	2,737775	2,296622	83,8864
FT=	0,172923	0,206049	0,618193	0,332389	0,248068	74,6318
b=	59,8	59,55	60	59,78333	0,225462	0,37713
d=	14,8	14,9	14,85	14,85	0,05	0,3367
P0.5mm/Pf =	0,828663	0,92126	1	0,916641	0,085762	9,35609
P1mm/Pf =	0,132505	0,141732	0,100775	0,125004	0,021484	17,1867
P1.4mm/Pf =	0,113545	0,133858	0,085271	0,110892	0,024402	22,0052
P2mm/Pf =	0,110877	0,149606	0,116279	0,125588	0,020975	16,7018
P2.8mm/Pf =	0,107226	0,149606	0,147287	0,134706	0,023827	17,6881

TABELA A 13 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras longas de vidro

1%SISAL CURTO E 1% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,170481	0,256933	0,209148	0,212188	0,043306	20,40921
MaxLoad=	0,216895	0,326106	0,238947	0,260649	0,05775	22,15608
FCstrength=	3,755678	5,679056	4,685331	4,706688	0,961867	20,43618
MOR=	4,778165	7,208016	5,352875	5,779685	1,269909	21,97195
TJCI=	0,432814	0,666154	0,447911	0,515626	0,130579	25,32434
FT=	5,21029	8,045996	0,002739	4,419675	4,079497	92,3031
b=	60,2	60	59,2	59,8	0,52915	0,884867
d=	14,4	14,4	14,4	14,4	0	0
P0.5mm/Pf =	1,074637	1,041417	1,029988	1,048681	0,023194	2,211728
P1mm/Pf =	1,18504	1,136091	1,110565	1,143899	0,037846	3,308546
P1.4mm/Pf =	1,239914	1,198225	1,152818	1,196985	0,043561	3,639218
P2mm/Pf =	0,146287	1,257396	0,252406	0,55203	0,613166	111,0747
P2.8mm/Pf =	0,005299	0,304733	0,184344	0,164792	0,150672	91,43148

TABELA A 14 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras curtas de sisal e 2% de fibras longas de vidro.

2%SISAL CURTO E 2% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 3	Média	Desvio Padrão	CV
FCLoad=	0,209042	0,228571	0,218807	0,01381	6,311295
MaxLoad=	0,273236	0,33492	0,304078	0,043617	14,34409
FCstrength=	4,430148	4,750623	4,590386	0,22661	4,936622
MOR=	5,790599	6,960978	6,375788	0,827583	12,98009
TJCI=	0,359384	0,636773	0,498078	0,196144	39,38007
TJCI4mm=	1,936201	1,632127	1,784164	0,215013	12,05118
FT=	4,161908	7,232058	5,696983	2,170924	38,10656
b=	60,05	60	60,025	0,035355	0,058901
d=	14,7	14,85	14,775	0,106066	0,717875
P0.5mm/Pf =	0,918528	0,986111	0,952319	0,047788	5,018087
P1mm/Pf =	1,052487	1,07639	1,064438	0,016902	1,587888
P1.4mm/Pf =	1,067371	1,145834	1,106603	0,055482	5,013705
P2mm/Pf =	1,104974	1,215278	1,160126	0,077997	6,723176
P2.8mm/Pf =	1,143359	1,312499	1,227929	0,1196	9,739958
P4mm/Pf =	1,231493	1,430557	1,331025	0,14076	10,57529
P6mm/Pf =	0,641988	0,458333	0,550161	0,129864	23,60471
P8mm/Pf =	0,477869	0,284723	0,381296	0,136575	35,81872

TABELA A 15 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras curtas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro.

1% SISAL CURTO E 3,14% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 2	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,237766	0,255346	0,246556	0,012431	5,04174
MaxLoad=	0,389258	0,3924	0,390829	0,002221	0,56834
FCstrength=	5,233224	5,475144	5,354184	0,171063	3,19494
MOR=	8,567567	8,413868	8,490717	0,108682	1,28000
TJCI=	0,371521	0,422427	0,396974	0,035997	9,06772
TJCI4mm=	1,014159	1,104552	1,059356	0,063917	6,03356
FT=	4,468392	4,949574	4,708983	0,340247	7,22549
b=	61,1	61	61,05	0,070711	0,11582
d=	14,3	14,5	14,4	0,141421	0,98209
P0,5mm/Pf =	0,713492	0,704114	0,708803	0,006632	0,93560
P1mm/Pf =	1,028055	1,055963	1,042009	0,019734	1,89380
P1,4mm/Pf =	1,094488	1,11819	1,106339	0,01676	1,51492
P1,8mm/Pf =	1,157265	1,170983	1,164124	0,0097	0,83325
P2mm/Pf =	1,157265	1,182367	1,169816	0,01775	1,51734
P2,8mm/Pf =	1,234021	1,228593	1,231307	0,003838	0,31170
P4mm/Pf =	1,348709	1,298044	1,323377	0,035825	2,70712
P6mm/Pf =	1,519308	1,423729	1,471518	0,067584	4,59281
P8mm/Pf =	1,637794	1,55125	1,594522	0,061196	3,83791

TABELA A 16 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 3,14% de fibras curtas de sisal e 1% de fibras longas de vidro.

3,14% SISAL CURTO E 1% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 2	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,261254	0,265024	0,263139	0,002666	1,01305
MaxLoad=	0,261254	0,299415	0,280335	0,026984	9,625487
FCstrength=	5,745846	5,729636	5,737741	0,011462	0,199772
MOR=	5,745846	6,473137	6,109491	0,514272	8,41759
TJCI=	0,353658	0,425682	0,38967	0,050928	13,06953
TJCI4mm=	0,84207	1,059219	0,950644	0,153548	16,15201
FT=	4,250336	5,028924	4,63963	0,550544	11,86612
b=	60,3	60,5	60,4	0,141421	0,234141
d=	14,4	14,5	14,45	0,070711	0,489347
P0,5mm/Pf =	0,995008	1,024674	1,009841	0,020977	2,077245
P1mm/Pf =	0,767289	0,934593	0,850941	0,118301	13,90241
P1,4mm/Pf =	0,79842	1,004721	0,901571	0,145877	16,1803
P1,8mm/Pf =	0,834453	1,06099	0,947721	0,160185	16,90217
P2mm/Pf =	0,840444	1,081651	0,961047	0,170559	17,74722
P2,8mm/Pf =	0,860228	1,122355	0,991291	0,185352	18,698
P4mm/Pf =	0,864041	1,034205	0,949123	0,120324	12,67737
P6mm/Pf =	0,694047	0,754351	0,724199	0,042641	5,888085
P8mm/Pf =	0,580778	0,607234	0,594006	0,018707	3,149335

TABELA A 17 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro

1% SISAL LONGO E 1% VIDRO CURTO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.208071	0.202419	0.204731	0.205074	0.002841	1.385532
MaxLoad=	0.208071	0.202419	0.204731	0.205074	0.002841	1.385532
FCstrength=	4.516242	4.52184	4.586379	4.541487	0.038978	0.858271
MOR=	4.516242	4.52184	4.586379	4.541487	0.038978	0.858271
TJCI=	0.313921	0.250822	0.218054	0.260932	0.048726	18.67394
TJCI4mm=	0.563149	0.683706	0.508196	0.585017	0.089775	15.34573
FT=	3.723361	3.061809	2.669312	3.151494	0.532717	16.90363
b=	61.1	60.2	59.2	60.16667	0.950438	1.579676
d=	14.4	14.3	14.4	14.36667	0.057735	0.401868
P0.5mm/Pf =	1	0.800563	1.014831	0.938465	0.119656	12.75024
P1mm/Pf =	0.532332	0.474701	0.539844	0.515626	0.03564	6.912042
P1.4mm/Pf =	0.533815	0.524109	0.519299	0.525741	0.007394	1.406409
P2mm/Pf =	0.547526	0.592081	0.547443	0.56235	0.025748	4.578613
P2.8mm/Pf =	0.580693	0.657672	0.580875	0.606413	0.044391	7.32033

TABELA A 18 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras longas de sisal e 2% de fibras curtas de vidro.

2% SISAL LONGO E 2% VIDRO CURTO	Teste 1	Teste 2	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.21824	0.258713	0.238477	0.028618	12.00044
MaxLoad=	0.21824	0.258713	0.23847	0.028618	12.00044
FCstrength=	4.883388	5.779388	5.33138	0.633567	11.88372
MOR=	4.883388	5.779388	5.33138	0.633567	11.88372
TJCI=	0.215638	0.470653	0.34314	0.180323	52.54992
TJCI4mm=	0.593183	1.039	0.81609	0.31524	38.62802
FT=	2.6367	5.745317	4.19100	2.198124	52.44856
b=	60.1	60.2	60.15	0.070711	0.117557
d=	14.3	14.3	14.3	0	0
P0.5mm/Pf =	0.985867	0.89149	0.938643	0.066784	7.115001
P1mm/Pf =	0.378247	0.47732	0.427787	0.070059	16.37717
P1.4mm/Pf =	0.408622	0.55636	0.482495	0.104474	21.65274
P2mm/Pf =	0.475433	0.659797	0.567615	0.130365	22.96714
P2.8mm/Pf =	0.543488	0.76373	0.653611	0.155739	23.8274
P4mm/Pf =	0.585859	0.80220	0.69403	0.152977	22.04189
P6mm/Pf =	0.590806	0.81845	0.704632	0.160974	22.84518
P8mm/Pf =	0.533245	0.78024	0.656746	0.174657	26.59428

TABELA A 19- Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 3,14% de fibras curtas de vidro.

1% SISAL LONGO E 3,14% VIDRO CURTO	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.171144	0.225954	0.198549	0.038756	19.5197
MaxLoad=	0.171144	0.225954	0.198549	0.038756	19.5197
FCstrength=	3.823192	4.664751	4.243972	0.595072	14.0215
MOR=	3.823192	4.664751	4.243972	0.595072	14.0215
TJCI=	0.230128	0.300056	0.265092	0.049447	18.6527
TJCI4mm=	0.546733	0.667565	0.607149	0.085442	14.0726
FT=	2.809196	3.385012	3.097104	0.407164	13.1465
b=	60,2	60	60,1	0,141421	0.23531
d=	14,3	14,9	14,6	0,424264	2.90591
P0.5mm/Pf =	0.75373	0.999913	0.876822	0.174078	19.8532
P1mm/Pf =	0.955478	0.739331	0.847404	0.152839	18.0361
P1.4mm/Pf =	0.812949	0.758554	0.785751	0.038463	4.89509
P2mm/Pf =	0.780118	0.525397	0.652757	0.180115	27.5929
P2.8mm/Pf =	0.84794	0.396649	0.622295	0.319111	51.2797
P4mm/Pf =	0.927015	0.625662	0.776339	0.213089	27.4479
P6mm/Pf =	0.901951	0.266138	0.584044	0.449588	76.9783

TABELA A 20 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 3,14% de fibras longas de sisal e 1% de fibras curtas de vidro.

3,14% SISAL LONGO E 1% VIDRO CURTO	Teste 2	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0.258702	0.258702	-	-
MaxLoad=	0.258702	0.258702	-	-
FCstrength=	5.514728	5.434568	-	-
MOR=	5.514728	5.514728	-	-
TJCI=	0.473762	0.473762	-	-
TJCI4mm=	0.94661	0.94661	-	-
FT=	5.51865	5.51865	-	-
b=	59.7	59.7	-	-
d=	14.7	14.7	-	-
P0.5mm/Pf =	0.879418	0.939709	-	-
P1mm/Pf =	0.465144	0.465144	-	-
P1.4mm/Pf =	0.556376	0.556376	-	-
P2mm/Pf =	0.653848	0.561154	-	-
P2.8mm/Pf =	0.751672	0.751672	-	-
P4mm/Pf =	0.790189	0.790189	-	-
P6mm/Pf =	0.818299	0.818299	-	-
P8mm/Pf =	0.768128	0.768128	-	-

TABELA A 21 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro

1% SISAL LONGO E 1% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 3	Médias	Desvio padrão	CV
FCload=	0,285245	0,291101	0,288173	0,004141	1,436835
MaxLoad=	0,285245	0,291101	0,288173	0,004141	1,436835
FCstrength=	6,382702	6,196199	0,263756	4,256731	4,930339
MOR=	6,382702	6,009696	6,196199	0,263756	4,256731
TJCI=	0,493078	0,786352	0,639715	0,207376	32,41695
TJCI4mm=	0,745569	1,038068	0,891819	0,206828	23,19172
FT=	6,029077	8,871049	7,450063	2,009578	26,97397
b=	60,1	60	60,05	0,070711	0,117753
d=	14,3	14,9	14,6	0,424264	2,905918
P0.5mm/Pf =	0,84683	0,621762	0,318294	51,19231	39,6344
P1mm/Pf =	0,946081	1,021338	0,98371	0,053215	5,409643
P1.4mm/Pf =	0,592213	0,923693	0,757953	0,234392	30,92429
P2mm/Pf =	0,418831	0,310488	0,364659	0,07661	21,00857
P2.8mm/Pf =	0,387705	0,305999	0,346852	0,057775	16,65686
P4mm/Pf =	0,395681	0,369762	0,382721	0,018327	4,788729
P6mm/Pf =	0,399748	0,314825	0,357286	0,060049	16,80704
P8mm/Pf =	0,360164	0,291595	0,32588	0,048485	14,87825

TABELA A 22 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 2% de fibras longas de sisal e 2% de fibras longas de vidro

2% SISAL LONGO E 2% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCload=	0,465592	0,434998	0,452293	0,450961	0,015341	3,401753
MaxLoad=	0,465592	0,434998	0,452293	0,450961	0,015341	3,401753
FCstrength=	9,82621	9,71742	10,62974	10,05779	0,4983	4,954366
MOR=	9,82621	9,71742	10,62974	10,05779	0,4983	4,954366
TJCI=	0,658671	0,748448	0,793706	0,733609	0,06875	9,36869
TJCI4mm=	1,563237	1,924413	2,816074	2,101241	0,644865	30,68974
FT=	7,596237	9,136393	10,19321	8,975279	1,305961	14,55064
b=	60,3	60,2	59,7	60,06667	0,321455	0,535164
d=	14,7	14,3	14	14,33333	0,351188	2,450152
P0.5mm/Pf =	0,608021	0,702432	0,585735	0,632063	0,061952	9,801583
P1mm/Pf =	0,72796	0,851856	0,78825	0,789355	0,061956	7,848901
P1.4mm/Pf =	0,794477	0,931242	0,856127	0,860615	0,068493	7,958572
P2mm/Pf =	0,874207	1,055186	0,951277	0,960223	0,100083	10,42294
P2.8mm/Pf =	0,960465	1,165173	0,999398	1,041679	0,108707	10,43572
P4mm/Pf =	0,74467	1,917428	1,142581	1,268226	0,596389	47,02545
P6mm/Pf =	0,639292	0,976794	1,169772	0,92862	0,268501	28,91399
P8mm/Pf =	0,55708	0,89087	1,10827	0,852073	0,277635	32,58348

TABELA A 23 – Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 1% de fibras longas de sisal e 3,14% de fibras longas de vidro

1% SISAL LONGO E 3,14% VIDRO LONGO	Teste 2	Teste 3	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,273755	0,283975	0,289698	0,022548	7,78325
MaxLoad=	0,549881	0,832961	0,691421	0,200168	28,9501
FCstrength=	5,886229	5,528789	0,505496	9,142988	11,4587
MOR=	11,82346	14,09338	12,95842	1,605073	12,3863
TJCI=	0,770485	0,757637	0,764061	0,009085	1,18903
TJCI4mm=	2,196345	3,48791	2,842128	0,913275	32,1334
FT=	9,052925	7,004879	8,028902	1,448187	18,0371
b=	60	59,7	59,85	0,212132	0,35443
d=	14,6	16,5	15,55	1,343503	8,63989
P0,5mm/Pf =	1,02191	0,980514	0,058542	5,970531	7,15345
P1mm/Pf =	1,43381	1,390462	1,36285	0,100352	7,36342
P1,4mm/Pf =	1,43381	1,455418	0,030559		13,8738
P2mm/Pf =	1,589523	1,887028	1,671389	0,115775	6,92688
P2,8mm/Pf =	1,829384	1,89097	0,087095	4,605857	47,4147
P4mm/Pf =	1,999011	2,314663	2,156837	0,223199	10,3484
P6mm/Pf =	0,416289	2,700673	1,558481	1,615304	103,646
P6mm/Pf =	0,294311	0,64855	0,471431	0,250485	53,1329

TABELA A 24– Resultados obtidos no ensaio de flexão do compósito com 3,14% de fibras longas de sisal e 1% de fibras longas de vidro

3,14% SISAL LONGO E 1% VIDRO LONGO	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média	Desvio padrão	CV
FCLoad=	0,136944	0,143687	0,155651	0,108611	0,136223	0,019968	14,6579
MaxLoad=	0,231752	0,22125	0,256824	0,187741	0,236608	0,028631	12,1004
FCstrength=	3,019366	3,195467	3,500341	2,09551	2,952671	0,604998	20,4898
MOR=	5,109693	4,920382	5,775573	3,622234	4,856971	0,901165	18,5540
TJCI=	0,265066	0,23446	0,2583	0,204639	0,240616	0,027342	11,3634
TJCI4mm=	0,757556	0,804386	0,860088	0,569554	0,747896	0,126065	16,8560
FT=	3,193565	2,849267	3,17419	2,157516	2,843634	0,483911	17,0173
b=	60,15	60,05	59,8	60,1	60,025	0,155456	0,25898
d=	14,4	14,35	14,3	15,4	14,6125	0,526585	3,60366
P0,5mm/Pf =	0,934065	0,975217	0,819999	0,957141	0,921606	0,0698	7,57371
P1mm/Pf =	1,10989	1,045759	1,020003	1,114284	1,072484	0,046957	4,37836
P1,4mm/Pf =	1,175824	1,13918	1,060001	1,200001	1,143752	0,061176	5,34875
P2mm/Pf =	1,285714	1,258104	1,180001	1,371426	1,273811	0,078988	6,20095
P2,8mm/Pf =	1,417584	1,379172	1,3	1,485715	1,395617	0,077488	5,55223
P4mm/Pf =	1,571429	1,517399	1,45	1,699999	1,559707	0,1059	6,789768
P6mm/Pf =	1,208792	0,833891	1,610001	1,9	1,388171	0,465683	33,54649
P8mm/Pf =	0,351648	0,632509	0,540002	0,585715	0,527468	0,123148	23,34691