

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS

EVANDRO BITTENCOURT

**PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS  
LIGNOCELULÓSICOS A PARTIR DE RESÍDUO DE MADEIRA  
PARTICULADO E FIBRAS VEGETAIS**

Florianópolis

2002

EVANDRO BITTENCOURT

PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE  
COMPÓSITOS LIGNOCELULÓSICOS A PARTIR DE  
RESÍDUO DE MADEIRA PARTICULADO E FIBRAS  
VEGETAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais na Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Orestes Estevam Alarcon

Outubro de 2002

# PROCESSAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS LIGNO-CELULÓSICOS A PARTIR DE RESÍDUO DE MADEIRA PARTICULADO E FIBRAS VEGETAIS

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Dr. Alexandre Lago  
Coordenador

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs  
ECV - UFSC

---

Prof. Dr. Dachamir Hotza  
EQA - UFSC

---

Prof. Dr. Márcio Celso Fredel  
EMC - UFSC

---

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves  
UNESP - Bauru

---

Prof. Dra. Marzely Gorges Farias  
UNIVILLE - Joinville

---

Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon  
Orientador - EMC - UFSC

---

Prof. Dr. Walter Lindolfo Weingaeertner  
EMC - UFSC

### Ficha Catalográfica

BITTENCOURT, Evandro

Processamento e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduo de madeira particulado e fibras vegetais

Florianópolis, UFSC, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2002.

157p.

Tese: Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais

Orientador: Orestes Estevam Alarcon

1. Reciclagem de resíduos 2. Chapa aglomerada 3. Fibras vegetais

I. Universidade Federal de Santa Catarina

II. Título

À minha família pelo apoio e carinho e aos professores que me mostraram o caminho da carreira acadêmica

# Agradecimentos

Ao Professor Orestes Estevam Alarcon, pelo apoio na proposição do tema de tese e por viabilizar o trabalho.

À Professora Marzely Gorges Farias, pelo apoio técnico e incentivo para o desenvolvimento do projeto.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, pelo apoio recebido.

À Universidade da Região de Joinville, pelo apoio recebido.

Aos irmãos Fernando e Jorge Xavier do Amaral, pelo incentivo constante e apoio técnico para o desenvolvimento do projeto, além da disponibilização dos equipamentos para fabricação das chapas aglomeradas.

Ao CTM/SENAI - São Bento do Sul, pela realização dos ensaios mecânicos e físicos.

Ao Grupo SISAL, pela doação das fibras de sisal.

À Royalplás, pela doação da resina utilizada no trabalho.

E a todos aqueles que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

## Sumário

Lista de Tabelas	10
Lista de Figuras	13
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>23</b>
2.1 DENSIDADE . . . . .	23
2.2 GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE . . . . .	26
2.3 TAMANHO DAS PARTÍCULAS . . . . .	31
2.4 A ADESÃO ENTRE PARTÍCULAS . . . . .	40
2.5 SIMULAÇÃO E MODELAGEM DOS COMPÓSITOS PARTICULADOS .	51
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>54</b>
3.1 MATÉRIAS-PRIMAS . . . . .	54
3.1.1 Resíduo de madeira . . . . .	54
3.1.2 Fibras vegetais . . . . .	58
3.1.3 Resina . . . . .	69
3.2 PROCESSAMENTO . . . . .	69
3.2.1 Enresinamento . . . . .	69
3.2.2 Formação . . . . .	75
3.2.3 Prensagem . . . . .	76
3.2.4 Corte dos corpos de prova . . . . .	76
3.2.5 Etapas do trabalho . . . . .	77
3.3 CARACTERIZAÇÃO . . . . .	78
3.3.1 Propriedades físicas . . . . .	79
3.3.2 Propriedades mecânicas . . . . .	79
3.3.3 Microestrutura . . . . .	84
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>85</b>
4.1 FASE 1 - ETAPA 1 . . . . .	85
4.1.1 Tensão de ruptura na flexão estática . . . . .	85
4.1.2 Módulo de elasticidade . . . . .	87
4.1.3 Arrancamento de parafuso na face . . . . .	88
4.1.4 Tração perpendicular (Ligação interna) . . . . .	90

		6
4.1.5	Absorção de água . . . . .	91
4.1.6	Inchamento em espessura . . . . .	92
4.1.7	Microestrutura . . . . .	93
4.2	FASE 1 - ETAPA 2 . . . . .	94
4.2.1	Tensão máxima na flexão estática . . . . .	94
4.2.2	Módulo de elasticidade na flexão estática . . . . .	96
4.2.3	Arrancamento de parafuso na face . . . . .	97
4.2.4	Tração perpendicular (Ligação interna) . . . . .	99
4.2.5	Absorção de água . . . . .	100
4.2.6	Inchamento em espessura . . . . .	101
4.2.7	Síntese dos resultados . . . . .	103
4.3	FASE 2 - ETAPA 1 . . . . .	103
4.3.1	Tensão de ruptura na flexão estática . . . . .	104
4.3.2	Módulo de elasticidade na flexão estática . . . . .	105
4.3.3	Arrancamento de parafuso na fase . . . . .	106
4.3.4	Tração perpendicular (Ligação interna) . . . . .	108
4.3.5	Absorção de água . . . . .	109
4.3.6	Inchamento em espessura . . . . .	111
4.3.7	Microestrutura . . . . .	112
4.4	FASE 2 - ETAPA 2 . . . . .	113
4.4.1	Tensão de ruptura na flexão estática . . . . .	113
4.4.2	Módulo de elasticidade . . . . .	117
4.4.3	Arrancamento de parafuso na fase . . . . .	120
4.4.4	Tração Perpendicular (Ligação Interna) . . . . .	123
4.4.5	Absorção de água . . . . .	126
4.4.6	Inchamento em espessura . . . . .	129
4.4.7	Síntese dos resultados . . . . .	132
4.4.8	Microestrutura . . . . .	134
4.5	ADESÃO NO COMPÓSITO PARTÍCULA/FIBRA . . . . .	136
4.5.1	Modelagem da zona de conformação Fibra-Partícula . . . . .	138
4.5.2	Resultados da modelagem . . . . .	139
4.5.3	Tamanho crítico da fibra . . . . .	143
4.5.4	Tensões perpendiculares ao plano do compósito . . . . .	146



	7
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	<b>149</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES . . . . .	152
<b>Referências</b>	<b>157</b>

## Lista de Tabelas

1	Inter-relações entre a densidade dos compósitos, processamento e propriedades . . . . .	23
2	Inter-relações entre o gradiente vertical de densidade dos compósitos, processamento e propriedades . . . . .	26
3	Inter-relações entre a geometria das partículas dos compósitos, processamento e propriedades . . . . .	31
4	Propriedades de chapa de partículas com três camadas com diferentes conteúdo de serragem (coníferas) na camada do núcleo (KEHR et al. apud ARENDS, 1985) . . . . .	38
5	Inter-relações entre a adesão entre partículas, processamento e propriedades	40
6	Tempo e temperatura para a condutividade máxima de chapas UF (WOLCOTT e RIALS, 1995) . . . . .	47
7	Propriedades de chapa de partículas feitas usando-se diferentes composições (CHAWLA et al., apud ARENDS, 1985) . . . . .	49
8	Propriedades de compósitos a partir de agro resíduos particulados (CHAWLA, apud ARENDS, 1985) . . . . .	50
9	Dimensões médias das partículas grossas . . . . .	56
10	Porcentagem de partículas retinas nas diferentes peneiras . . . . .	58
11	Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal . . . . .	59
12	Propriedades físicas e mecânicas da fibra da bananeira . . . . .	66
13	Propriedades da resina Royalfor 110 . . . . .	69
14	Porcentagem de partículas retinas nas diferentes peneiras . . . . .	74
15	Fases/etapas 1/2 do trabalho . . . . .	78
16	Propriedades requeridas para chapa de partículas, ANSI A208.1-1993 (FPL, 1999) . . . . .	80
17	FASE 1 - Etapa 1 - Tensão de ruptura (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	86
18	FASE 1 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	87
19	FASE 1 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso (N)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	89
20	FASE 1 - Etapa 1 - Ligação interna (kPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	90

21	FASE 1 - Etapa 1 - Absorção de água (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	91
22	FASE 1 - Etapa 1 - Inchamento em espessura (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	92
23	FASE 1 - Etapa 2 - Tensão de ruptura (MPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	95
24	FASE 1 - Etapa 2 - Módulo de elasticidade (MPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	96
25	FASE 1 - Etapa 2 - Força de arrancamento de parafuso (N) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	98
26	FASE 1 - Etapa 2 - Ligação interna (kPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	99
27	FASE 1 - Etapa 2 - Absorção de água (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	100
28	FASE 1 - Etapa 2 - Inchamento em espessura (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	102
29	Resumo geral dos resultados da FASE 1 . . . . .	103
30	FASE 2 - Etapa 1 - Tensão de ruptura (MPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	104
31	FASE 2 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade (MPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	105
32	FASE 2 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso (N) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	107
33	FASE 2 - Etapa 1 - Ligação interna (kPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	108
34	FASE 2 - Etapa 1 - Absorção de água (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	110
35	FASE 2 - Etapa 1 - Inchamento em espessura (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	111
36	FASE 2 - Etapa 2 - Tensão de ruptura (MPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	113
37	FASE 2 - Etapa 2 - Módulo de elasticidade (MPa) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	117
38	FASE 2 - Etapa 2 - Força de arrancamento de parafuso (N) (média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	120

39	FASE 2 - Etapa 2 - Ligação interna(kPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	123
40	FASE 2 - Etapa 2 - Absorção de água(%)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	126
41	FASE 2 - Etapa 2 - Inchamento em espessura(%)(média, desvio padrão e coeficiente de variação) . . . . .	129
42	Resumo Geral dos Resultados da FASE 2 . . . . .	133
43	Ligação interna simulada e caracterizada com adição de fibras de sisal . . .	148

## Lista de Figuras

1	Análise granulométrica típica para serragem de espécies de conífera (KLAUDITZ e BURO, apud KOLMANN et. al., 1975) . . . . .	33
2	Efeito da espessura das lascas (coníferas) e densidade da chapa sobre a resistência a flexão, conteúdo de resina de 8% (KLAUDITZ, apud KOLMANN et al., 1975) . . . . .	35
3	Efeito do tamanho da lasca, espécie da madeira, e densidade sobre a resistência a flexão (MOR) das chapas de partículas feitas com resina fenólica (8%, base peso) (KLAUDITZ, apud KOLMANN et al., 1975) . . . . .	36
4	Influência da porcentagem de serragem na camada do núcleo sobre algumas propriedades (KEHR et al. apud ARENDS, 1985) . . . . .	38
5	Dependência da resistência ao cisalhamento de juntas com adesivo sobre a espessura da linha de adesivo (MAXWELL, apud KOLMANN et al., 1975)	44
6	Detalhe das partículas grossas . . . . .	55
7	Detalhe das partículas finas . . . . .	57
8	Detalhe da microestrutura da fibra de sisal . . . . .	61
9	Detalhe da microestrutura da fibra da vassoura . . . . .	63
10	Detalhe da microestrutura da fibra de madeira . . . . .	64
11	Detalhe do processamento para obtenção das fibras da bananeira . . . . .	67
12	Detalhe da microestrutura da fibra da bananeira . . . . .	68
13	Detalhe do misturador . . . . .	71
14	Detalhe das partículas grossas enresinadas no pós-misturador . . . . .	73
15	Detalhe das partículas finas enresinadas no pós-misturador . . . . .	74
16	Detalhe da formação do colchão . . . . .	75
17	Detalhe da prensagem . . . . .	76
18	FASE 1 - Etapa 1 - Tensão de ruptura . . . . .	86
19	FASE 1 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade . . . . .	88
20	FASE 1 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso . . . . .	89
21	FASE 1 - Etapa 1 - Ligação Interna . . . . .	90
22	FASE 1 - Etapa 1 - Absorção de água . . . . .	91
23	FASE 1 - Etapa 1 - Inchamento em Espessura . . . . .	92
24	Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 1 feitas com partículas grossas . . . . .	94
25	FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Tensão de ruptura	95

26	FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Módulo de elasticidade . . . . .	97
27	FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Força de arrancamento de parafuso . . . . .	98
28	FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Ligação interna	99
29	FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Absorção de água	101
30	FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Inchamento em espessura . . . . .	102
31	FASE 2 - Etapa 1 - Tensão de ruptura . . . . .	104
32	FASE 2 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade . . . . .	106
33	FASE 2 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso . . . . .	107
34	FASE 2 - Etapa 1 - Ligação interna . . . . .	108
35	FASE 2 - Etapa 1 - Absorção de água . . . . .	110
36	FASE 2 - Etapa 1 - Inchamento em Espessura . . . . .	111
37	Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas . . . . .	112
38	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Tensão de ruptura . . .	114
39	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Tensão de ruptura . . . .	116
40	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Módulo de elasticidade	118
41	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Módulo de elasticidade . .	119
42	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras . . . . .	121
43	Partículas finas com fibras . . . . .	122
44	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Ligação interna . . . . .	124
45	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Ligação interna . . . . .	125
46	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Absorção de água . . .	127
47	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Absorção de água . . . . .	128
48	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Inchamento em espessura	130
49	FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Inchamento em espessura	131
50	Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras de sisal . . . . .	134
51	Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras da bananeira . . . . .	135
52	Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras da madeira . . . . .	135

53	Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras de vassoura . . . . .	136
54	Adesão entre partículas . . . . .	137
55	Adesão entre partículas . . . . .	137
56	Modelo para análise com elemento finito . . . . .	139
57	Resultado da modelagem para fibras com diferentes diâmetros . . . . .	140
58	Geometria da zona de não-aderência . . . . .	140
59	Superfície de contato entre partículas em função da razão de compactação	141
60	Perímetro da fibra sem contato em função da razão de compactação . . . .	142
61	Razão da largura do defeito pelo diâmetro da fibra em função da razão de compactação . . . . .	143
62	Tensão desenvolvida na fibra segundo o seu tamanho . . . . .	145
63	Superfície de contato entre partículas em função da razão de compactação para fibra com 0,2mm de diâmetro, linha e equação de tendência . . . . .	147
64	O princípio da Ciência e Engenharia de Materiais aplicado a fabricação de compósitos com resíduo particulado de madeira e fibras vegetais . . . . .	149

## RESUMO

Neste trabalho, chapas aglomeradas foram obtidas a partir da combinação de resíduos de madeira particulados, oriundos da fabricação de móveis, da espécie *Pinus* e de fibras vegetais, sisal (*Agave sisalana*), fibra do pseudocaulo da bananeira, fibra de madeira (*Pinus*) e fibra de sorgo-vassoura (*Sorghum*). Sabe-se que as partículas resultantes do beneficiamento da madeira são impróprias para o processamento de chapas aglomeradas, devido a seu formato desigual e sua concavidade natural, gerando chapas de baixa resistência mecânica. Para resolver esse problema foi utilizado o conceito norteador da Ciência e Engenharia de Materiais, ou seja, a correlação entre processamento  $\leftrightarrow$  propriedades  $\leftrightarrow$  estrutura. Assim, modificou-se a estrutura da chapa aglomerada adicionando fibras naturais como reforço. Visto que o processo de enresinamento é sem dúvida um dos mais importantes na fabricação de compósitos particulados de madeira e que a distribuição da resina nas partículas deve ser homogênea, de modo a permitir que todas tenham suficiente aderência. Foi fabricado um pós-misturador, equipamento utilizado para friccionar as partículas após a pulverização da resina, objetivando melhorar a distribuição da resina nas faces das partículas. Foram produzidas chapas aglomeradas de média densidade ( $0,75 \text{ g/cm}^3$ )( $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}$ ), com 10% (peso seco do material lignocelulósico) de resina comercial uréia-formaldeído, prensadas a temperatura de  $160^\circ\text{C}$  por 10 minutos. As propriedades caracterizadas foram à tensão de ruptura na flexão estática, o módulo de elasticidade, a tensão de ruptura na tração perpendicular (ligação interna), a força de arrancamento de parafuso na face, absorção de água e inchamento da espessura após imersão por 24 horas. A caracterização da estrutura da chapa foi realizada com a ajuda de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A ação de fricção das partículas durante o processo no pós-misturador melhorou sensivelmente a adesão entre as partículas, resultado traduzido pelo acréscimo relativo de até 427% na ligação interna. O reforço com as fibras permitiu uma melhora relativa significativa, principalmente nas propriedades dependentes da resistência paralela ao plano da chapa. Assim, a tensão de ruptura à flexão teve um acréscimo relativo de até 52% com a adição de apenas 5% de fibras de sisal cortadas com 2 cm de comprimento. O estudo da estrutura pela MEV mostrou dificuldades na adesão na interface entre as partículas planas e as fibras arredondadas. Isto denotou um estudo teórico da região de contato partícula/fibra através de modelagem com elemento finito. O modelo comprovou os resultados das propriedades mecânicas caracterizadas, principalmente aquelas referentes à ligação interna do compósito partícula/fibra. As propriedades resultantes viabilizam a utilização de chapas aglomeradas de média densidade na fabricação de móveis, feitas com resíduo particulado de madeira reforçada com fibras vegetais.



## ABSTRACT

In this work, particleboard had been gotten from the combination of planer shavings, deriving of the manufacture of furniture, the *Pinus* species and vegetal staple fibres, sisal fiber (*Agave sisalana*), banana fiber, woodfiber (*Pinus*) and sorghum fiber. It is known that the planer shavings are improper for the particleboard processing, had its different format and its natural concavity, generating plates of low resistance mechanics. To decide this problem the concept of the Science and Engineering of Materials was used, or either, the correlation between processing $\leftrightarrow$ properties $\leftrightarrow$ structure. Thus, it was modified structure of the particleboard adding natural fiber as reinforcement. Since the blending process is without a doubt one of most important in the manufacture of wood composites and that the distribution of the resin in particles must be homogeneous, in order to allow that all have sufficient bonding. A post-blending was manufactured, used equipment to rub particles after the spraying of the resin, objectifying to improve the distribution of the resin in the faces of particles. Medium density particleboard had been produced of (0,75 g/cm<sup>3</sup>)(30x30x1 cm), with 10% (dry weight of the lignocelulosic material) of commercial resin urea formaldehyde, pressed the temperature of 160°C per 10 minutes. The characterized properties had been the modulus of rupture, the modulus of elasticity, the internal bonding, the force of pulling-up screws in the face, water absorption and swelling after immersion for 24 hours. The characterization of the structure of the plate was carried through with the aid of scanning electron microscopy (SEM). The frictional action of particles during the process in post-blending significantly improved the adhesion between particles, resulted translated for the relative addition of up to 427% in the internal bonding. The reinforcement with natural fiber allowed a significant relative improvement, mainly in the dependent properties of the parallel resistance to the plan of the particleboard. Thus, the modulus of rupture had a relative addition of up to 52% with the addition of only 5% of cut sisal fiber with 2 cm of length. The study of the structure (SEM) showed to difficulties in the adhesion in the interface between plain particles and rounded off vegetal fiber. This denoted a theoretical study of the contact region particle/fiber through the modeling with finite element. The model proved the results of the characterized mechanical properties, mainly that referring a internal bonding of the composite particle/fiber. The resultant properties make possible the medium density particleboard use in the manufacture of furniture made with planer shavings and natural fiber.

# 1 INTRODUÇÃO

As indústrias brasileiras de móveis de madeira faturam cerca de 3,9 bilhões de reais anualmente, sendo que 10% é faturado com o mercado externo e existe um incentivo governamental para o aumento dessas exportações (ABIMÓVEL, 2000). O Estado de Santa Catarina - maior exportador e terceiro maior produtor de móveis do país - possui mais de 900 fábricas de móveis, emprega cerca de 18 mil pessoas e contribuiu com 55% do total exportado em 1999. O principal pólo moveleiro do estado e um dos maiores do Brasil - São Bento do Sul - constitui o maior centro exportador do país, com quase 40% do total das exportações nacionais.

Das matérias-primas, provenientes de material lenhoso, usadas na fabricação de móveis, 86% são madeira sólida e 14% painéis reconstituídos (SINDIMÓVEL, 1999). O elevado preço dos painéis de madeira aglomerada no Brasil, entre 10% e 15% acima do nível internacional, explica-se principalmente pelo fator da elevada estrutura de custos da indústria nacional, pois o aglomerado no Brasil é feito exclusivamente com extratos de madeira virgem, enquanto no resto do mundo são utilizados em parte resíduos de madeira (ABIMÓVEL, 2000).

Existe um grande interesse mundial no uso de recursos naturais renováveis, especialmente os chamados agrorecursos (ou materiais a base de celulose e lignina – lignocelulósicos). Os lignocelulósicos incluem a madeira e os resíduos do seu processamento, restos e resíduos de agriculturas, grama, plantas aquáticas, papel reciclado, papel, papelão e produtos correlatos.

A Agenda 21, que resume as premissas mundiais sobre o meio ambiente, adotadas a partir da Assembléia Geral da ONU de 22 de dezembro de 1989, reflete um consenso mundial e um compromisso político no nível mais alto no que diz respeito a desenvolvi-

mento e cooperação ambiental. No seu Capítulo 11, a Agenda 21, descreve as políticas para combater o desflorestamento, dentre as quais, podemos citar:

- melhorar os métodos e práticas ambientalmente saudáveis e economicamente viáveis de exploração das florestas, com o objetivo de reduzir os resíduos e, se possível, otimizar seu uso e aumentar o valor dos produtos florestais;
- desenvolver, expandir e/ou melhorar a eficácia e a eficiência das indústrias de processamento de produtos florestais, tanto madeireiros como não-madeireiros, inclusive de aspectos como tecnologia eficiente de conversão e melhor utilização sustentável dos resíduos resultantes da extração e do processamento.

Historicamente (até aproximadamente 1920), o ocidente dependia em grande parte de materiais baseados em recursos primários. Com a chegada dos plásticos, metais de alta performance, materiais cerâmicos, e outros sintéticos, perdeu-se o interesse pelo uso de materiais derivados da natureza (agromateriais).

No início deste novo milênio temos uma grande necessidade de novos materiais devido a expansão mundial da população. A população mundial atingiu 1 bilhão em 1830, tendo em 1930 passado para 2 bilhões. Em outubro de 1999, oficialmente a população mundial atingiu 6 bilhões de pessoas. Enquanto a população levou 100 anos para aumentar em 1 bilhão de pessoas em 1930, a atual taxa de crescimento é de 94 milhões a cada ano, o que deve acrescer a população mundial de 1 bilhão de pessoas em aproximadamente 11 anos.

Aliado a este fato, em todos os países do mundo em desenvolvimento, em especial no Brasil com a estabilização da economia, existe uma expansão do poder aquisitivo das “classe média e pobre”, criando um número crescente de emergentes consumidores industriais, que necessitam de novos materiais.

Atualmente há um grande número de pessoas tentando reutilizar os resíduos sólidos, reciclando-os. Por um lado, isto é bom, mas por outro, a má qualidade destes materiais reciclados, pode comprometer uma política real de reutilização de resíduos sólidos. O processamento de materiais a partir de resíduos deve ser repensado. Portanto, os pesquisadores precisam se empenhar na criação do conhecimento em torno da reutilização de resíduos sólidos.

Ao contrário do processamento de materiais a partir de matérias-primas virgens, onde se usa somente as matérias-primas adequadas para fornecer o produto com as propriedades finais desejadas, o processamento de materiais a partir de resíduos, deve além de prover meios de selecionar e separar, tentar utilizar todos os tipos de resíduos. Somente dessa forma a reciclagem poderá mudar o panorama mundial de degradação dos recursos naturais. Sem dúvida, a ciência tem muito a contribuir para com a tecnologia da reciclagem, descobrindo novas formas de transformação de resíduos sólidos em materiais com qualidade superior.

O processamento da madeira sólida produz de 15 a 30% de resíduos, que atualmente são queimados ou simplesmente lançados na natureza, causando graves problemas ao meio ambiente, mas que podem ser aproveitados para a fabricação de painéis reconstituídos. Por outro lado, as condições tecnológicas para a fabricação de painéis reconstituídos com o uso de 100% de resíduos se mantém sem solução. O estudo científico baseado na Ciência e Engenharia de Materiais tem condições de resolver estas questões tecnológicas envolvendo o uso de resíduos de madeira e outros resíduos lignocelulósicos na fabricação de painéis compósitos <sup>\*1</sup> .

A essência do processamento de materiais compósitos pode se adequar a produção de

---

<sup>1\*</sup>A palavra "compósito" (do latim "compositus"), refere-se ao material constituído de vários componentes distintos cuja associação confere ao conjunto propriedades que isoladamente não possuem.

compósitos lignocelulósicos a partir do aproveitamento de resíduos particulados.

A produção comercial de compósitos utilizando-se os resíduos de madeira como matéria prima complementar é uma realidade na Europa e Estados Unidos. No Brasil esta realidade não acontece ainda, o desinteresse comercial possivelmente deve-se à “grande” quantidade de matéria-prima virgem disponível. Existe, assim, a necessidade de pesquisas dentro desta área, adequadas a realidade local.

Cientista e engenheiros tem conseguido maior sucesso no projeto de compósitos reforçados com fibras sintéticas que em compósitos baseados em madeira. A dificuldade de obter sucesso com a madeira é principalmente devido a complexidade da sua microestrutura e variabilidade. Contudo, é necessário que haja competência no engendramento dos compósitos de madeira, para que estes produtos sejam competitivos com outros materiais no futuro (WOLCOTT et al., 1994).

Os compósitos de madeira planos são obtidos por prensagem à quente que providencia o contato entre as partículas promovendo a adesão. O calor é usado nesta operação para amolecer as partículas de madeira e acelerar a cura do adesivo. Contudo, temos um resultado secundário da prensagem, que é o desenvolvimento da estrutura do material, que ultimamente tem desempenhado um grande papel na performance dos materiais de engenharia (LANG e WOLCOTT, 1996a).

Assim, os compósitos lignocelulósicos tem uma microestrutura desordenada e partículas que variam altamente suas propriedades físicas e mecânicas (STAHL et al., 1997).

Em função dessa realidade verifica-se que há uma necessidade de empreender novos estudos sobre o quanto é significante os efeitos das variações da microestrutura sobre as propriedades dos compósitos (SHI e GARDNER, 1999). Mas, a maioria dos estudos envolvendo as propriedades dos compósitos de madeira são qualitativos, com uma abordagem

subjetiva (XU e SUCHSLAND, 1997).

Resumindo o exposto:

- a indústria moveleira produz grande quantidade de resíduo de madeira particulado e necessita de chapas aglomeradas a um custo competitivo;
- a utilização de resíduos é primordial para o meio ambiente;
- a fabricação de chapas aglomeradas a partir de resíduo particulado de madeira (maravalhas) se mantém sem solução, visto os resultados negativos de trabalhos recentes (BRITO, 1995).

A partir disso, levanta-se as seguintes hipóteses:

- é possível adequar o processo de enresinamento para as partículas geradas das operações de aplainamento da madeira (maravalhas) apesar da concavidade natural e irregularidade destas;
- o reforço com fibras vegetais pode maximizar as características mecânicas e físicas das chapas aglomeradas feitas com maravalhas, atingindo assim os níveis estabelecidos pela norma comercial americana ANSI A208.1-1993 para utilização na fabricação de móveis;
- o desenvolvimento de um modelo matemático, que descreva uma relação entre estrutura, processamento e propriedades resultantes da compressão das partículas, no momento da prensagem dos compósitos lignocelulósicos, pode ser uma ferramenta complementar ao entendimento e ao desenvolvimento destes materiais.

Delineado as hipóteses, define-se o objetivo geral desse trabalho como sendo: contribuir para viabilizar o desenvolvimento da tecnologia de reaproveitamento de resíduos de

madeira particulada e de fibras vegetais, para fabricação de compósitos lignocelulósicos para utilização na indústria moveleira, com propriedades e custos competitivos.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- obtenção de chapas aglomeradas de média densidade para fabricação de móveis segundo a norma comercial americana ANSI A208.1-1993;
- desenvolver um processo de enresinamento adequado para o resíduo particulado de madeira;
- estudar o comportamento das diferentes fibras nas propriedades das chapas aglomeradas;
- desenvolver uma metodologia de processamento para compósitos a partir de resíduos particulados;
- desenvolver um modelo para previsão da resistência de ligação interna em função da razão de compactação de chapas aglomeradas, levando em consideração o contato entre partícula e fibra vegetal.

Como metodologia serão utilizados os conceitos da Ciência e Engenharia de Materiais envolvendo estrutura-processamento-propriedades para obtenção de materiais compósitos a base de resíduos de madeira particulada com elevado desempenho.

A Tese é constituída dos seguintes capítulos:

O Capítulo 1, Revisão Bibliográfica, aborda o estudo da estrutura dos compósitos particulados a partir de matéria-prima lignocelulósica, enfatizando as correlações entre estrutura $\Leftrightarrow$ propriedades $\Leftrightarrow$ processamento.

No Capítulo 2, Materiais e Métodos, é feita a caracterização das matérias-primas utilizadas, resíduo de madeira particulado e fibras vegetais, bem como da resina utilizada,

bem como, descreve a técnica de processamento utilizada na fabricação das chapas aglomeradas, bem como a fabricação do misturador utilizado no enresinamento. Além disso, é feito uma descrição das técnicas utilizadas para a caracterização das chapas aglomeradas processadas.

O Capítulo 3, Resultados e Discussão, apresenta os resultados obtidos das propriedades físicas e mecânicas caracterizadas. Além disso, é apresentada a metodologia e os resultados do modelamento envolvendo a adesão de partículas e fibras.

Por fim é apresentada as Considerações finais e conclusões.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O enfoque deste capítulo é voltado para a base da Ciência e Engenharia de Materiais, ou seja, as correlações entre estrutura, processamento e propriedades.

Para os compósitos laminado tipo o compensado, a estrutura do material após consolidação é ditada primariamente pela geometria dos elementos de madeira constituintes. Contudo, os materiais produzidos com elementos descontínuos de madeira tais como fibras, partículas, e lascas, a estrutura final do material é controlada não somente pelos próprios elementos, mas também pelas operações de formação e prensagem (LANG e WOLCOTT, 1996a).

Cada subcapítulo é reservado para um fator da estrutura dos compósitos lignocelulósicos. No início de cada subcapítulo é feito um quadro resumo das inter-relações entre o tópico da estrutura as condições de processamento e as propriedades finais do compósito lignocelulósico.

### 2.1 DENSIDADE

A densidade dos compósitos lignocelulósicos varia muito conforme as condições de processamento, as quais influenciam em diversas propriedades. Estas correlações estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Inter-relações entre a densidade dos compósitos, processamento e propriedades

Processamento	Estrutura	Propriedades
Razão de compactação Quantidade de resina Densidade da madeira Formação do colchão	Densidade	Módulo de elasticidade Módulo de ruptura Ligação interna Absorção de água Inchamento em espessura Expansão linear

A densidade final da chapa segundo KELLY (1997), depende da quantidade de partículas de madeira no colchão, densidade da espécie de madeira utilizada, umidade das partículas, conteúdo de resina e outros aditivos. O autor coloca ainda que a densidade da madeira é a propriedade mais importante para determinar a potencialidade de uma dada espécie para fabricação de chapas de partículas.

Para uma determinada densidade final da chapa de partículas, teremos um volume maior de partículas quando usamos uma espécie de baixa densidade em relação a espécies de madeiras mais densas. Quando comprimimos o colchão de partículas de madeira para as dimensões finais da chapa, quanto maior o volume de partículas maior o contato relativo entre as partículas (MOSLEMI, 1974).

Sem dúvida, o contato relativo entre as partículas de madeira é um fator muito importante na estrutura de compósitos particulados.

Segundo MOSLEMI (1974), nas chapas de partículas de média densidade, mesmo que ocorra uma distribuição de quantidade maior de adesivo por unidade de área superficial sobre as partículas de madeiras mais densas, o contato relativo entre as partículas de madeira menos densa é o fator controlador das propriedades de resistência. Já para chapas de partículas de alta densidade, a quantidade de adesivo por unidade de área superficial das partículas passa a ser o fator controlador da resistência da chapa. Por causa destes efeitos as chapas de partículas de uma determinada densidade, produzida com espécies de baixa densidade, apresentam maior resistência à flexão estática e ligação interna, embora a resistência ao arrancamento de parafusos, absorção de água e inchamento em espessura são poucos afetados.

Segundo MALONEY (1977), para se produzir chapas de média densidade, uma determinada espécie de madeira é adequada quando temos a razão entre a densidade da

chapa e densidade da madeira em torno de 1,3. Isto determina o uso de uma pressão de consolidação do colchão de partículas que assegura uma melhor ligação entre as partículas.

A razão de compactação (Equação 1) pode ser um fator controlador da estrutura dos compósitos lignocelulósicos, ou seja, do contato relativo entre as partículas.

$$RC = \frac{D_{\text{compósito}}}{D_{\text{partículas}}} \quad (1)$$

Onde :

RC = razão de compactação

$D_{\text{compósito}}$  = densidade final do compósito

$D_{\text{partículas}}$  = densidade das partículas usadas no compósito

Devido a propriedades físicas e mecânicas dos compósitos de madeira serem muito sensitivos a variação de densidade, é difícil fazer comparações adequadas quando ocorrem diferenças na densidade com diferentes chapas. Para solucionar esse problema, podemos usar métodos que envolvem o cálculo da resistência específica que é a resistência do compósito pela gravidade específica. Além disso, existem métodos estatísticos como o método de análise de covariância e o método do indicador de variável (SHI e GARDNER, 1999).

Segundo XU e SUCHSLAND (1997), a influência da densidade da chapa sobre a expansão linear não está totalmente esclarecida, alguns pesquisadores não encontraram relação entre a densidade da chapa e a expansão linear (TURNER, 1954; SUCHSLAND, 1972). Já KELLY (1997), relata tanto acréscimo quanto decréscimo na expansão linear com o aumento da densidade da chapa. Os autores XU e SUCHSLAND (1997), após modelarem o comportamento da expansão linear chegaram a conclusão que pode existir uma relação secundária entre a densidade e a expansão linear, mas os principais fatores

que controlam são a expansão linear das partículas componentes e a orientação delas em relação a direção considerada.

Existe uma variação da densidade no sentido horizontal das chapas. Isso acontece devido a diversos fatores, tais como, a inerente variação da densidade da madeira, descontinuidade das partículas da madeira, variabilidade no processo de formação do colchão, em especial nas chapas processadas em laboratório que geralmente são formadas a mão. Esta variação característica da densidade é de difícil controle (SHI e GARDNER, 1999).

A densidade, teor de umidade e temperatura afetam as propriedades elásticas da madeira. Suas interações com as propriedades são complexas e desconhecidas (SUO e BOWYER, 1994).

## 2.2 GRADIENTE VERTICAL DE DENSIDADE

O processo de fabricação por prensagem à quente dos compósitos lignocelulósicos condiciona a formação de um gradiente de densidade vertical ao longo da espessura. Esta variação de densidade entre a superfície e o miolo modifica-se de acordo com o processamento e interfere em diversas propriedades dos compósitos lignocelulósicos (Tabela 2).

Tabela 2: Inter-relações entre o gradiente vertical de densidade dos compósitos, processamento e propriedades

Processamento	Estrutura	Propriedades
Geometria das partículas Distribuição da umidade do colchão Tempo de fechamento da prensa Temperatura da prensa Reatividade da resina Resistência à compressão das partículas de madeira	Gradiente vertical de densidade	Módulo de elasticidade Módulo de ruptura Ligação interna Qualidade da superfície Arrancamento de prego e parafuso

O gradiente vertical de densidade das chapas de partículas é um dos fatores que mais

influencia as propriedades da chapa. O gradiente vertical de densidade é usualmente determinado por métodos diretos, tais como o gravimétrico ou um método indireto tal como as técnicas densimétricas que usam raios X ou raios gama. O gradiente de densidade distingue as chapas de partículas da madeira sólida e do compensado (SUO e BOWYER, 1994).

O teor de umidade das partículas exerce grande influência na estrutura da chapa, no que tange ao desenvolvimento de um gradiente de densidade ao longo da espessura da chapa.

Segundo MALONEY (1977), um maior conteúdo de umidade das partículas da superfície em relação as partículas do miolo do colchão, resulta em maior gradiente de densidade da chapa.

Devido à umidade reduzir a resistência à compressão da madeira, existe um acréscimo da densificação das camadas superficiais durante o início da prensagem. A densificação excessiva da superfície é acompanhada pela densidade relativamente baixa do miolo da chapa. A maior densificação superficial provoca um aumento na resistência a flexão estática e na tração paralela a chapa, mas por outro lado a menor densidade do miolo diminui a resistência a ligação interna e ao arrancamento de parafuso (KELLY, 1997).

Para uma chapa de determinada densidade, o maior gradiente de densidade resulta no aumento da resistência a flexão estática e reduz a ligação interna (MALONEY, 1977).

A ação do gradiente de densidade sobre as propriedades das chapas é ambígua, por um lado aumenta a resistência à flexão estática, por outro diminui a ligação interna. O gradiente de densidade (Equação 2) pode ser um indicador da qualidade da estrutura dos

compósitos particulados.

$$GD = \frac{D_{\text{superfície}}}{D_{\text{miolo}}} \quad (2)$$

Onde :

GD = gradiente de densidade do compósito

$D_{\text{superfície}}$  = densidade na superfície do compósito

$D_{\text{miolo}}$  = densidade do miolo do compósito

A tempo de fechamento da prensa deve ser o mais rápido possível para termos um gradiente de densidade mais acentuado e maior produção (KOLMANN et al., 1975).

O módulo de elasticidade aumenta tanto quanto maior for o pico de densidade, este relacionamento é de longe reconhecido pela indústria de compósitos de madeira (KELLY, 1997).

As modificações no perfil de densidade vertical alteram diversas propriedades, entre outras, qualidade da superfície das chapas, características do contorno dos cantos, a performance quanto ao arrancamento de pregos e parafusos, a performance quanto à laminação dos cantos, propriedades de resistência à flexão estática e resistência de ligação interna. Por outro lado o perfil de densidade é alterado pelas características de processamento dos compósitos, tais como, conteúdo de umidade das partículas e tempo de fechamento da prensa. Alto conteúdo de umidade das partículas do colchão combinados com taxas de fechamento rápido da prensa resulta em grandes diferenças entre a densidade da face e do núcleo (WINISTORFER et al., 1996).

Não existe relatos experimentais sobre o possível relacionamento entre expansão linear e o gradiente vertical de densidade de compósitos, a modelagem mostrou que pode existir uma relação secundária (XU e SUCHSLAND, 1997).

A maioria dos estudos envolvendo os gradientes verticais de densidade são qualitativos, com uma abordagem subjetiva, isto é, a forma usual do gradiente vertical de densidade foi usada para interpretar e caracterizar a influência dos parâmetros da prensagem sobre o gradiente vertical de densidade e a influência do gradiente vertical de densidade sobre as propriedades da chapa (XU, 1999).

Existe a necessidade de realizar estudos sobre o quanto é significativo os efeitos das variações da microestrutura sobre as propriedades das chapas, tais como a variação do gradiente de densidade, que afeta certas propriedades dos compósitos (rigidez). Pode haver diferenças no gradiente de densidade de amostras retiradas de locais diferentes de chapas devido à variação da densidade do material, formação do colchão, temperatura, e conteúdo de umidade do compósito (SHI e GARDNER, 1999).

O perfil do gradiente vertical de densidade normalmente tem a forma de U, com alta densidade nas camadas superficiais, e baixa densidade no miolo. As propriedades das chapas de partículas são grandemente afetadas pela forma do gradiente vertical de densidade. Gradientes acentuados melhoram as propriedades de flexão, por seu turno, gradientes planos melhoram a resistência de ligação interna com perdas na resistência a flexão (SUO e BOWYER, 1994).

A conversão dos dados de medida discretas do gradiente vertical de densidade através da análise da função inversa de Fourier levou a equacionar o gradiente vertical de densidade na Equação 3 (XU, 1999).

$$DEN = A_o + \sum_{k=1}^{k=N-1} A_k \cos[2k\pi x/T - \theta_k] \quad (3)$$

Onde:

DEN = densidade num determinado ponto ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$T$  = espessura da chapa (mm);

$x$  = ponto na espessura (mm);

$N$  = número de pontos usados para descrever o gradiente vertical de densidade;

$A_k$  = magnitude do  $k$ -ésimo ponto da transformada de Fourier;

$\theta_k$  = ângulo da transformada de Fourier.

A simulação através da Equação 3 para uma chapa com densidade de  $0,7 \text{ g/cm}^3$  e espessura 10 mm, mostrou que (XU, 1999):

- a porção interna da chapa (aproximadamente  $2 < x < 8$  mm) muito pouco contribui para o módulo de elasticidade, ou a função que descreve o módulo de elasticidade na flexão é insensível ao tipo de distribuição da densidade na vertical nesta região;
- a porção externa (camada externa de 2 mm) controla o módulo de elasticidade na flexão da chapa, ou a função que descreve o módulo de elasticidade é sensível ao tipo de distribuição da densidade na vertical. Esta diferença da função que descreve o módulo de elasticidade nesta parte externa da chapa que explica a influência da distribuição da densidade na vertical;
- o módulo de elasticidade na flexão pode ser maximizado quando o pico da intensidade da densidade ao longo da espessura da chapa estiver posicionado a 14% da face da chapa.

Seria importante otimizar a distribuição da densidade na vertical para maximizar simultaneamente o módulo de elasticidade e a resistência de ligação interna, fazendo considerações teóricas.



### 2.3 TAMANHO DAS PARTÍCULAS

A estrutura dos compósitos lignocelulósicos depende muito da distribuição granulométrica e da forma das partículas usadas na fabricação. A Tabela 3 mostra as correlações entre o aspecto estrutural do tamanho e forma das partículas, o processamento e as propriedades resultantes nos compósitos lignocelulósicos.

Tabela 3: Inter-relações entre a geometria das partículas dos compósitos, processamento e propriedades

Processamento	Estrutura	Propriedades
Distribuição granulométrica Forma das partículas Pressão de compactação Temperatura de prensagem	Geometria das partículas	Módulo de elasticidade Módulo de ruptura Ligação interna Absorção de água Inchamento em espessura Fluência

Sem dúvida, dentre as diversas variáveis que influenciam a estrutura dos compósitos particulados, as dimensões, a forma, e a disposição, das partículas no compósito são as mais importantes.

Os elementos dimensionais das partículas de diferente geometria são: comprimento, largura e espessura. A razão de esbeltez é a razão entre o comprimento e a espessura (Equação 4)

$$RE = \frac{c}{e} \quad (4)$$

Onde :

RE = razão de esbeltez

c = comprimento da partícula

e = espessura da partícula

Outro índice é o resultado da área superficial das partículas por unidade de peso (Equação 5).

$$AS = \frac{A}{P} \quad (5)$$

Onde :

AS = área superficial por unidade de peso

A = área superficial da partícula

P = unidade de peso

Segundo MOSLEMI (1974), a razão de esbeltez deve estar em torno de 120 a 200 para as partículas da superfície. Adotando-se esta faixa de razão, teremos partículas finas e longas, possuindo alto grau de flexibilidade, em particular quando obtidas de madeiras de espécies de média e baixa densidade. Já as partículas usadas no miolo da chapa, devem ter a razão de esbeltez perto de 60.

A razão de esbeltez por sua vez exerce grande influência sobre as características vitais da chapa, como: área de contato entre as partículas no compósito, propriedades mecânicas e consumo relativo de adesivo. Quanto menor a razão de esbeltez, maior é a quantidade de área superficial das laterais e extremidades das partículas que recebe adesivo, mas, contribuem muito pouco na ligação entre partículas.

Atualmente é colocada grande ênfase sobre a qualidade da superfície do compósito, principalmente no uso na fabricação de móveis, por isso são usadas partículas com elevada razão de esbeltez na superfície, as chamadas semifibras, com a mínima quantidade de partículas cúbicas que reduzem a usinabilidade das bordas (JAGER, 1992).

KIMOTO et al. apud MOSLEMI (1974), observaram que a resistência ao arrancamento de parafuso aumenta com a razão de esbeltez até 50, acima deste valor não foi

observado aumento na resistência.

A utilização de resíduos de madeira para fabricação de compósitos tem que se adaptar as condições da matéria-prima disponível, com o objetivo do aproveitamento completo deste rejeito, evitando qualquer tipo de utilização secundária. Os resíduos particulados muitas vezes ocorrem em dimensões incompatíveis, no caso da serragem, resíduo proveniente das operações com serra e lixamento, a quantidade de finos é muito grande. Por outro lado, o resíduo proveniente das operações de aplainamento, tem suas dimensões superiores as ideais.

Uma análise típica das partículas de serragem obtidas de espécies de coníferas é mostrado na Figura 1 (KLAUDITZ e BURO, apud KOLMANN et al., 1975), onde podemos notar que as principais frações são a R<sub>3</sub> e R<sub>4</sub>, que juntas fazem quase 70% do peso total, enquanto as suas superfícies específicas tem aproximadamente de 15 a 33 m<sup>2</sup>/kg.

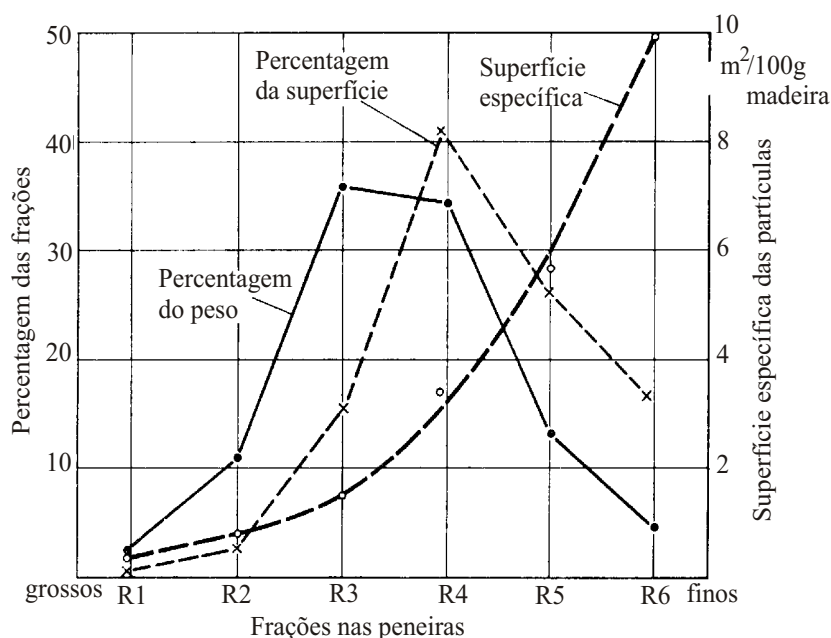


Figura 1: Análise granulométrica típica para serragem de espécies de coníferas (KLAUDITZ e BURO, apud KOLMANN et. al., 1975)

Uma vantagem é que os resíduos industriais de madeira na forma de serragem e aparas

se encontram mecanicamente desintegrados, trazendo algumas vantagens ao processo de fabricação de chapas de partículas, economizando energia necessária para a cominuição dos troncos de madeira (KOLMANN et al., 1975).

A qualidade da serragem de serrarias varia com a espécie de madeira, estação do ano, condições de tempo e confiabilidade do fornecedor entre outras (JAGER, 1992).

As maravalhas de madeira são pequenas partículas de madeira com dimensões indefinidas desenvolvidas incidentalmente a certas operações de trabalho com a madeira envolvendo dispositivos de corte rotativos. O corte das maravalhas geralmente é feito ao longo das fibras e devido esta ação de corte produz lascas finas de variadas espessuras, usualmente com um bordo chanfrado e o outro grosso, geralmente as maravalhas são onduladas (MALONEY, 1977).

A densidade aparente da manta é afetada se as partículas individuais são curvas, tortas, ou onduladas, geralmente quanto maior a ondulação maior a quantidade de vazio no colchão e menor a densidade aparente. Estes espaços vazios devem ser convenientemente eliminados durante a consolidação dos compósitos (LANG e WOLCOTT, 1996a).

KLAUDITZ, citado por KOLMANN et al. (1975), começou em 1946 um estudo de maneira técnica científica a dependência da resistência e qualidade da chapa de partículas sobre os seguintes fatores: forma e tamanho das partículas, espécie de madeira e densidade da chapa. Uma conclusão resultante das primeiras investigações foi que o relacionamento entre comprimento, espessura e largura das partículas não somente determina as superfícies internas disponíveis para a colagem, mas também as propriedades de resistência da chapas bem como o custo de fabricação. Os resultados de KLAUTIZ são sumarizados pela Figura 2 e Figura 3.

Podemos notar pela Figura 2 que existe uma forte correlação entre a espessura das

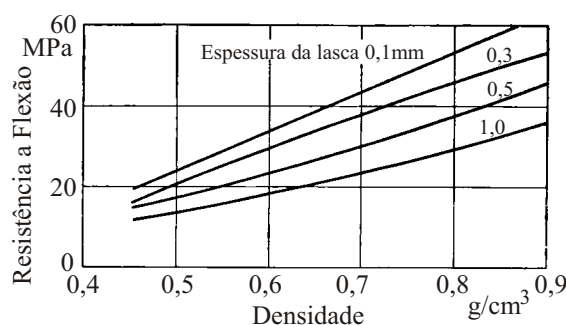


Figura 2: Efeito da espessura das lascas (coníferas) e densidade da chapa sobre a resistência a flexão, conteúdo de resina de 8% (KLAUDITZ, apud KOLMANN et al., 1975)

lascas e a resistência à flexão. Para chapas de mesma densidade, a diminuição da espessura em 1 décimo, no caso passando de 1,0 mm para 0,1 mm, aproximadamente dobra a resistência à flexão da chapa.

Na Figura 3 podemos notar que a resistência a flexão das chapas (MOR) feitas a partir de serragem (linha 6) mostra-se correlacionada geometricamente com a densidade da chapa, atingindo valores de resistência razoáveis somente quando fabricada com alta densidade.

ERIKSSON (1977), registrou patente (USP: 4.035.120) onde indica um método para produzir chapas de partículas a partir da utilização de 100% de resíduos de madeira (serragem). Fazendo uma classificação pelo tamanho de partícula, dividindo inicialmente em duas partes, a primeira de partículas menores que 1 mm, a segunda de partículas menores que 4,75mm e maiores que 1mm, que são cortadas fornecendo partículas menores que 2,375 mm e maiores que 0,5mm. A composição dos dois grupos levou a duas frações: grossas (menores que 2,375mm e maiores que 1,4mm) e finas (menores que 1,4mm). As partículas finas podem ser ainda divididas em dois três grupos: menores que 1,4mm a 0,71mm; menores que 0,71 a 0,5mm e menores que 0,25mm. As chapas foram formadas em 5 camadas. A resistência a flexão obtida foi de 46 MPa e a ligação interna de 1,4

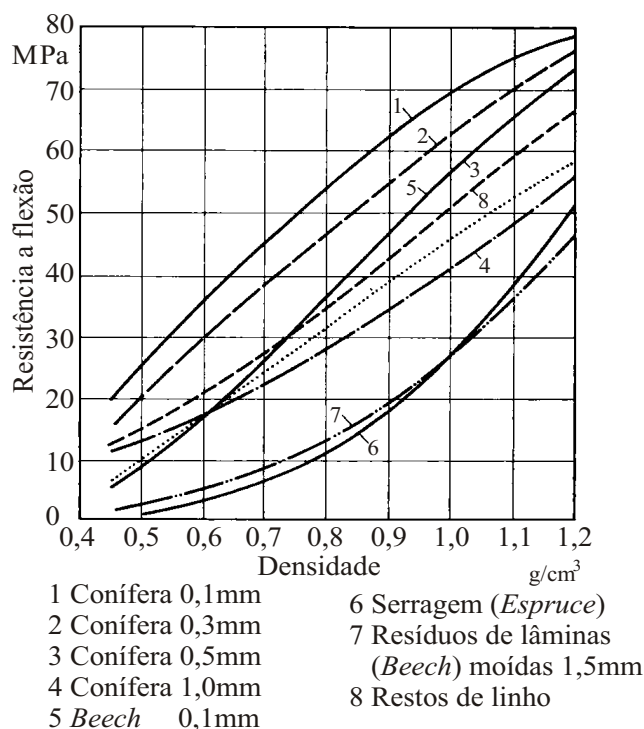


Figura 3: Efeito do tamanho da lasca, espécie da madeira, e densidade sobre a resistência a flexão (MOR) das chapas de partículas feitas com resina fenólica (8%, base peso) (KLAUDITZ, apud KOLMANN et al., 1975)

MPa para densidade da chapa de  $950 \text{ kg/m}^3$ . A explicação para as propriedades foi que as partículas pequenas (todas menores que 10mm) se posicionarem não somente paralelas ao plano da chapa, se interpondo ao efeito de compressão no momento da prensagem à quente, resultando num acréscimo da pressão, o que levou numa melhor compactação das camadas da superfície, provocando alta densidade destas camadas.

As operações no processamento da madeira levam a produção de uma quantidade razoável de finos. A tentativa de ser utilizar a totalidade destes resíduos deve encontrar uma solução viável para o aproveitamento dos finos. Os finos absorvem muito mais adesivo que as partículas grossas (ARENDS, 1985; JAGER, 1992), além de reduzir a qualidade da chapa, por causa da sua habilidade de peneirar através do compósito e, conseqüentemente, reduzir a ligação interna entre a camada superficial e a camada do

miolo do compósito (JAGER, 1992).

No registro de uma patente (CAMPBELL, 1998) apresentou um método para uma nova composição de chapas, onde indica a divisão das partículas em duas partes. As partículas mais finas (que passam pela malha 40), são as únicas que recebem resina, trabalham como veículo enresinador.

A produção de chapas de partículas a partir de resíduo particulado necessita de uma compactidade solta de aproximadamente 120-180 kg/m<sup>3</sup>. Para isto as partículas de serragem têm que ser peneiradas, separando as partículas grossas, que devem ser reduzidas (KEHR, E., apud ARENDS, 1985).

KEHR, citado por ARENDS (1985), indicou que a resistência a flexão (MOR) da chapa de três camadas com densidade de 680 kg/m<sup>3</sup>, decresceu perto de 10% com o acréscimo de serragem de 25 para 50% nas camadas das faces, e próximo de 20% com o uso de 100% de serragem nas camadas das faces.

Em outro estudo, KEHR et al., citado por ARENDS (1985), tem os resultados um pouco contraditórios. O primeiro trabalho mostra a variação da resistência a flexão (MOR), ligação interna(LI) e inchamento em espessura (IE, após duas horas de imersão em água ) pelo acréscimo da quantidade de serragem na camada do núcleo (Figura 4). O incremento da quantidade de serragem no núcleo das chapas teve influência positiva sobre a tensão de ligação interna e o inchamento em espessura.

Outro estudo dos mesmos autores traz resultados que não mostram claramente a mudança das propriedades mecânicas quando o conteúdo de serragem é alterado na camada do núcleo da chapa de três camadas (Tabela 4).

Conforme GEIMER (1976), apud XU e SUCHSLAND (1998), o módulo de elasticidade aumenta com o aumento do tamanho da partícula e com aumento do nível de orientação

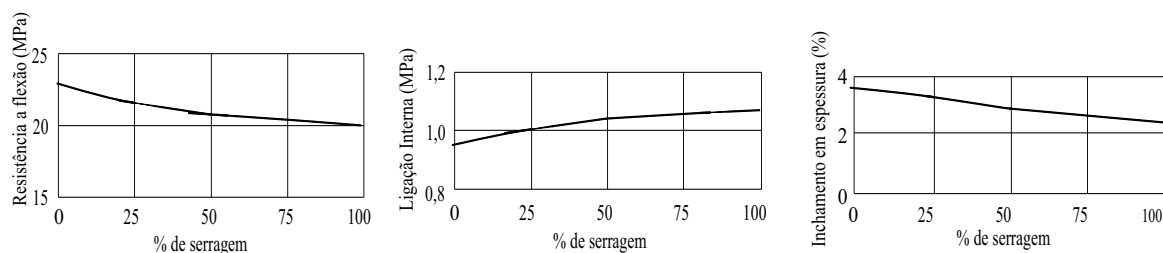


Figura 4: Influência da porcentagem de serragem na camada do núcleo sobre algumas propriedades (KEHR et al. apud ARENDS, 1985)

Tabela 4: Propriedades de chapa de partículas com três camadas com diferentes conteúdo de serragem (coníferas) na camada do núcleo (KEHR et al. apud ARENDS, 1985)

conteúdo de serragem %		0	15	30	50
densidade	kg/m <sup>3</sup>	668	656	674	657
MOR	MPa	21,3	21,0	21,1	21,2
LI	MPa	0,58	0,55	0,61	0,63
IE	%	2,7	2,4	2,5	2,8

das partículas.

Nos painéis compósitos, as partículas pequenas têm uma maior tendência de orientação fora do plano que as partículas grandes, a diminuição do módulo de elasticidade (E) relatados na literatura pelo uso de partículas pequenas deve ser tomado do efeito da orientação fora do plano que pela diminuição do tamanho da partícula por si mesmo. Devido a esta interação inerente, a influência real do tamanho da partícula sobre as propriedades das chapas não pode ser determinada experimentalmente. A orientação das partículas nunca foi medida em chapas de partículas e não é conhecido qual é a extensão da orientação fora do plano das partículas existente nos vários compósitos de madeira, como ela é controlada pelo tamanho de partícula, e quanto é o resultado da perda no módulo de elasticidade nos painéis de madeira comerciais devido a esta componente de orientação (XU e SUCHSLAND, 1998).

XU e SUCHSLAND (1998), modelaram o comportamento do módulo de elasticidade



de painéis compósitos a partir do volume de cada partícula e sua orientação em relação a direção do esforço considerado, através de uma somatória da elasticidade das partículas (Equação 6).

$$E = \frac{\sum V_i E_\theta}{V} \quad (6)$$

Onde:

$V_i$  = volume de cada partícula;

$V$  = volume total

$E_\theta$  = Modulo de elasticidade da partícula com orientação  $\theta$  em relação a direção do esforço.  $E_\theta = E_1 E_2 / (E_1 \sin^2 \theta + E_2 \cos^2 \theta)$ , onde  $E_1$  e  $E_2$  são os módulos longitudinal e transversal respectivamente.

As conclusões principais da simulação com relação às partículas foram: 1) o tamanho de partícula não influencia no módulo de elasticidade; 2) a orientação fora do plano das partículas diminui o módulo de elasticidade; 3) em compósitos com partículas orientadas, a orientação no plano aumenta o módulo de elasticidade na direção da orientação mas, reduz o módulo de elasticidade perpendicular a direção de orientação; o decréscimo do módulo de elasticidade perpendicular a direção de orientação atinge seu nível final após 50-60% aproximadamente das partículas estarem alinhadas.

O grau de deformação na fluência produzida em chapas de partículas sujeitas a carregamento de flexão é afetada pelo tamanho e forma das partículas, orientação das partículas, bem como pelas características dos adesivos, a duração da carga e a umidade relativa do ambiente (NIEMZ e REGENSBURGER, 1980 apud ZIEGLER, 1981).

## 2.4 A ADESÃO ENTRE PARTÍCULAS

Os compósitos lignocelulósicos possuem uma matriz muito discreta formada pelo adesivo. Apesar disto a adesão entre partículas e fator controlador da qualidade dos compósitos lignocelulósicos sendo influenciada pelo processamento e influenciando nas propriedades finais (Tabela 5).

Tabela 5: Inter-relações entre a adesão entre partículas, processamento e propriedades

Processamento	Estrutura	Propriedades
Adesivo (quantidade, distribuição, cura) Pressão de compactação Temperatura da prensa Tamanho e forma das partículas	Adesão entre partículas	Módulo de elasticidade Módulo de ruptura Ligação interna Absorção de água Inchamento em espessura

Em termos da teoria da adesão, a formação das forças de ligação envolve molhamento, adsorção e interdifusão da resina no substrato da madeira. O molhamento é a habilidade da resina espalhar-se (fluir), entrando em contato com o substrato (madeira), desse modo formando um contato molecular entre a madeira e resina. A adsorção envolve a orientação e adesão das moléculas na interface da madeira-resina, enquanto que a interdifusão envolve a difusão das moléculas do adesivo ou segmentos moleculares através da interface dentro do substrato da madeira (WILSON e KRAHMER, 1978).

A cobertura das superfícies das partículas pela resina é um importante fator que afeta as propriedades das chapas de partículas. Um modo de medir o efeito do espalhamento de resina e tomar a quantidade da cobertura de adesivo, ou seja, a quantidade de adesivo espalhada sobre uma unidade de superfície de área das partículas.

MALONEY (1970), apud SUO e BOWYER (1995), relatou que para se conseguir adequada adesão nas chapas de partículas é necessário espalhar de 1 a 3,4 gramas de

adesivo por metro quadrado de superfície de área das partículas.

Os dados de LEHMANN (1974), apud SUO e BOWYER (1995), mostraram que o módulo de elasticidade aumentou 9,95% e 14,03% , quando se espalhou o dobro e a tripla quantidade de resina (a partir do conteúdo de 3% ) respectivamente.

A quantidade de resina espalhada pode ser calculada pela Equação 7 (SUO, 1985, apud SUO e BOWYER, 1995).

$$q = \frac{(CR)(d)}{2 \left( \frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} + \frac{1}{e_3} \right)} \quad (7)$$

Onde:

q = quantidade de resina espalhada;

CR = conteúdo de resina (%);

d = densidade (gcm<sup>3</sup>);

e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub> = comprimento, largura e espessura da partícula (cm).

O tempo, temperatura e umidade são variáveis envolvidas no processamento dos compósitos, críticas no momento da prensagem devido estas variáveis controlar o comportamento mecânico do componente lignocelulósico e a cura do adesivo. O efeito da ligação dos adesivos é crucial para a integridade dos compósitos lignocelulósicos. Um grande esforço tem sido feito para avaliar a qualidade dos adesivos através de testes, principalmente testes de ligação interna. Adicionalmente existem técnicas para determinar o tempo de formação de gel (*gel time*) usando-se Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) (CHRISTIANSEN, apud WOLCOTT e RIALS, 1995).

Na fase de enresinamento acontece a mistura das partículas de madeira com o adesivo. O objetivo é que haja uma distribuição uniforme do adesivo em todas as partículas, e em cada partícula em particular, espera-se que toda a área superficial receba a quantidade

adequada.

A umidade das partículas interfere de duas formas na cura do adesivo, ou seja, na convecção do calor por toda a espessura da chapa e na velocidade de polimerização da resina.

Segundo MOSLEMI (1974), o vapor de água gerado no colchão durante a prensagem a quente, migram da superfície para o interior da chapa e do centro para as bordas. A velocidade de transferência de calor por convecção é mais efetiva na cura do adesivo do que o calor transferido por condução através da madeira e do ar.

O calor latente fornecido ao interior da chapa pela condensação do vapor de água formado na superfície do colchão é suficiente para curar a resina quando usamos resinas de temperaturas moderadas de cura (ex. uréia-formaldeído, melamina-formaldeído, e isocianato) (HSU, 1991).

Segundo KELLY (1997), a umidade excessiva interfere negativamente na reação química de polimerização da resina, retardando a cura, requerendo ciclo de prensagem mais longo, também para possibilitar a liberação suficiente da umidade contida no interior da chapa.

O teor de umidade das partículas varia normalmente entre 2% a 7% do peso seco das partículas. A aplicação do adesivo como uma solução aquosa, aumenta o teor de umidade das partículas para 8 a 12% , que é reduzido pela prensagem a quente para 5 a 9% (FPL, 1999).

Todas as pesquisas indicam que o aumento do conteúdo de resina em um determinado tipo de compósito resulta numa melhora das propriedades de resistência. A questão é encontrar o nível econômico de resina ideal que otimize as propriedades, devido ao alto custo relativo do adesivo na fabricação de compósitos particulados.

Segundo KELLY (1997), o conteúdo de resina ideal depende muito do tipo de partículas,

sobretudo da sua área superficial, quando almejamos aspectos técnicos em termos da qualidade do compósito produzido e de aspectos econômicos.

A percentagem do conteúdo de resina influencia no tempo de cura do adesivo. O conteúdo de umidade do colchão de partículas em contato com os pratos da prensa quente tem dois efeitos no processo de cura (KOLMANN et al., 1975):

- Diluição da resina pela água, atrasando a pré cura;
- O vapor gerado nas regiões externas da chapa melhora a condução de calor no núcleo da chapa.

As resinas mais utilizadas da chapa de partículas incluem uréia-formaldeído e em menor extensão fenol-formaldeído, melamina-formaldeído e isocianato. O tipo e a quantidade de resina utilizada dependem do uso desejado do produto. O conteúdo de resina baseado no peso seco das partículas varia entre 4 a 10% , usualmente entre 6 a 9% para resinas uréia-formaldeído. O conteúdo de resina da superfície geralmente é maior que no miolo. Usualmente a resina uréia-formaldeído é introduzida na forma de solução aquosa com aproximadamente 50 a 65% de sólidos. Junto com a resina são adicionados emulsões de cera microcristalina ou parafina para melhorar a exposição a umidade. A quantidade de cera adicionada é aproximadamente 0,3 a 1% com base no peso seco das partículas (FPL, 1999).

Operações de pré cura do adesivo pode ser realizada entre a operação de pré-prensagem e a prensagem à quente. Muitas vezes é utilizado o aquecimento por radio freqüência ou microondas. As temperaturas do pré-aquecimento variam em torno de 80°C (KOLMANN et al., 1975).

Quando usamos resinas de alta temperatura de cura (ex. resinas fenólicas), a temperatura atingida pelo calor de condensação no miolo da chapa pode ser insuficiente.

Uma solução é injetar vapor de água super aquecido no colchão de partículas durante a prensagem. Os fatores envolvidos são a pressão e temperatura do vapor, secura do vapor, temperatura das placas da prensa, conteúdo de umidade da manta, tamanho da manta, densidade da chapa, massa do colchão, ciclo de vaporização, seqüência de vaporização/exaustão, fluxo de vapor, e tipo de resina (HSU, 1991).

Não há dúvidas que a resistência a tração das chapas de partículas são afetadas pela adesão entre partículas e pela resistência a tração própria das partículas (HOYLE, 1973).

A espessura da camada de adesivo deve ser a mais fina possível, como podemos verificar na Figura 5, onde temos a resistência ao cisalhamento numa junta com adesivo aumenta com a diminuição da espessura da junta (MAXWELL apud KOLMANN et al. (1975)).

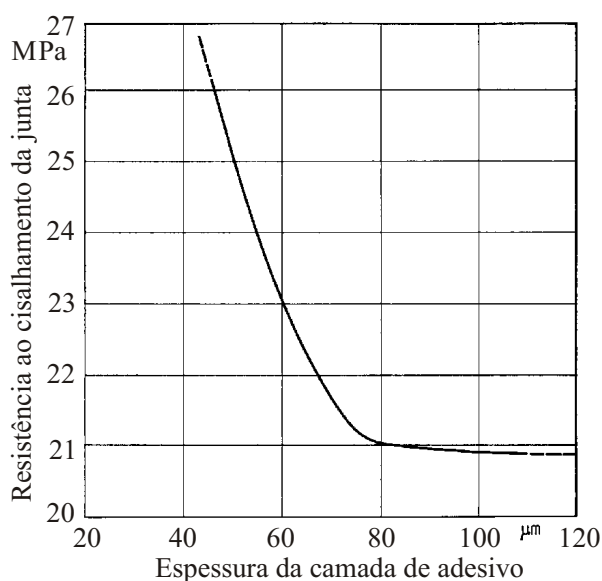


Figura 5: Dependência da resistência ao cisalhamento de juntas com adesivo sobre a espessura da linha de adesivo (MAXWELL, apud KOLMANN et al., 1975)

KOLMANN et al. (1975), forneceram alguns pontos explicando a melhor resistência da camada fina de adesivo em relação a camadas mais grossas:

- A tensões de retração são mais altas nas camadas mais espessas de adesivo;

- A probabilidade de falha é muito menor nas camadas mais finas de adesivo do que nas camadas mais grossas;
- A plasticidade é reduzida nas linhas finas de adesivo.

A falha entre duas partículas coladas pode ocorrer, é claro, no adesivo, na interface entre o adesivo e/ou na partícula de madeira (partícula lignocelulósica) ou na partícula de madeira. A Equação 8 relaciona a tensão aplicada ( $\sigma$ ) é o módulo de elasticidade, ambos no adesivo (A) e na madeira (M). Se o índice da tensão aplicada pelo módulo de elasticidade para a madeira for menor que para o adesivo (como mostra a Equação 8), a falha irá ocorrer na partícula colada. Por outro lado, ao contrário o índice da tensão aplicada pelo módulo de elasticidade para o adesivo for menor que para a madeira, a falha irá ocorrer na linha do adesivo.

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_M \leq \left(\frac{\sigma}{E}\right)_A \quad (8)$$

Onde :

$\sigma_M$  = tensão aplicada na madeira

$\sigma_A$  = tensão aplicada no adesivo

$E_M$  = módulo de elasticidade da madeira

$E_A$  = módulo de elasticidade do adesivo

Nas chapas de partículas com várias camadas podemos variar a quantidade de adesivo entre elas. A variação da quantidade de adesivo varia de 7 a 10% , calculados pelo peso seco das partículas (KOLMANN et al., 1975).

Segundo XU e SUCHSLAND (1997), a linha de cola como componente tem sido encontrada como sendo um fator insignificante em relação a expansão linear dos compósitos de madeira. Somente pode ser justificável quando a quantidade excede substancialmente

10%, o que pode modificar certas propriedades (módulo de elasticidade e orientação da partícula) da madeira por impregnação.

WILSON e KRAHMER (1978), estudaram a correlação entre as propriedades de molhamento, distribuição de peso molecular, com a resistência de ligação interna e o módulo de ruptura para chapas de partículas feitas com resinas fenólicas. As variáveis de molhamento e resistência mecânica (ligação interna e módulo de ruptura) não tiveram uma correlação significativa, talvez devido as variáveis de molhamento se alterarem com o tempo. O coeficiente de correlação entre a ligação interna (LI) e a razão da área sobre a distribuição do peso molecular para as moléculas de tamanho médio pela área total foi de  $r = -0,905$ , já o coeficiente de correlação entre a ligação interna e a razão da área sobre a distribuição do peso molecular para as moléculas de grande tamanho pela área total foi de  $r = 0,835$ . A explicação foi que quanto mais moléculas de pequeno e médio tamanho estão presente menor é o LI, devido ser compreensível que estas moléculas penetrarem mais facilmente na madeira e assim definharem a linha de cola, por isso o decréscimo da quantidade de moléculas de médio e pequeno peso molecular e o aumento da quantidade de moléculas de alto peso molecular retém uma alta porcentagem de resina na linha de cola para aderência.

WOLCOTT e RIALS (1995), monitoraram a cura do adesivo (UF) in situ em compósitos baseados em madeira através da análise dielétrica, a condutividade dos polímeros é inversamente proporcional a viscosidade. Os microsensores foram colocados ao longo da espessura da chapa em três posições (10, 25 e 50% da chapa com base no peso). A Tabela 6 resume os resultados indicando os máximos na condutividade. Dois estágios de cura são notados nas faces e na região média das chapas. O primeiro máximo pode ser resultado tanto de um movimento de água para estas regiões ou um lento processo de



cura resultante da secagem da resina. O segundo máximo pode ser resultado do aumento de cura a altas temperaturas após a resina amolecer. A água contida na resina UF e no colchão tornam complicado a análise.

A desistência inicial de se produzir chapas a partir de resíduos particulados foi, dentre outras razões, o excessivo consumo de adesivo, bem como sua distribuição nas partículas, os finos absorvem muito mais adesivo que as partículas grossas (ARENDS, 1985).

Tabela 6: Tempo e temperatura para a condutividade máxima de chapas UF (WOLCOTT e RIALS, 1995)

Processamento		Condutividade Máxima	
Posição (%)	Temperatura da prensa (°C)	Tempo (minutos)	Temperatura (°C)
Miolo (50)	165°	2,17	126°
Média (25)	165°	1,26 / 3,04	90° / 142°
Face (10)	165°	0,9 / 3,11	90° / 144°
Miolo (50)	138°	4,5	117°

CAMPBELL (1998), registrou patente onde após uma divisão das partículas pelo tamanho através de peneiramento, somente as partículas mais finas (que passam pela malha 40), recebem resina. Em seguida mistura-se as partículas finas enresinadas às outras partículas. O objetivo é: a) reduzir a quantidade de resina; b) homogeneidade na estrutura da chapa, pois os finos enresinados preenchem os interstícios; c) reduzir a energia com enresinamento. Campbell cita ainda que o enresinamento dos finos é feito num misturador de alta energia (2500 rpm), mais rápido que os misturadores em geral, que trabalham a velocidades de 1000 a 1500 rpm.

Com o objetivo de melhorar a distribuição do adesivo entre as partículas, existem aditivos que melhoram a capacidade de contato do adesivo e partículas.

NYLUND et al. (1994), registrou patente onde ela usa um espumante, no caso sangue de boi. A mistura foi sangue de boi, 2 a 4% em peso, com 96 a 98% (em peso) de

uréia-formaldeído. A adesivo espumoso cresce em volume de 5 a 15 vezes, permitindo uma mistura mais homogênea, o que leva a uma possível diminuição na quantidade de adesivo de 12 a 30%, com aumento das propriedades das chapas. NYLUND apresenta resultados comparativos na fabricação de chapas, obtendo resultados significativos: LI com um aumento de até 12%; MOR com aumento de até 37% e E com aumento de até 27%.

A faixa de pressão varia normalmente entre 1,4 a 3,5 MPa, geralmente partículas de madeira de espécies de conífera necessitam menor pressão que partículas de madeira de espécies de folhosa (KOLMANN et al., 1975).

Não ocorrem normalmente danos a resinas uréia-formaldeído ou a madeira pelo uso de altas temperaturas. Embora a decomposição térmica da madeira começa próxima de 170°C, o tempo necessário à exposição a esta temperatura é muito maior que os tempos de prensagem (KOLMANN et al., 1975).

A faixa de temperatura de 130°C a 160°C são convenientes para a manufatura de chapas de partículas (KOLMANN et al., 1975).

ARENDS (1985), cita a produção de chapas a partir de serragem e casca de pinheiro numa experiência na Índia, onde foi usado na prensagem à quente 2,5 a 3,5 MPa por 15 minutos a uma temperatura de 145 a 150°C, sendo que a resina era a fenol-formaldeído.

ARENDS (1985), cita uma experiência na Índia, que descreve produção de chapas a partir de serragem e casca de pinheiro. Além disso, é utilizado um adesivo alternativo obtido do cozimento da madeira, a lignina sulfonatada. A casca de pinheiro também possui um adesivo natural, devido a presença de taninos e substâncias fenólicas. Foram testadas diversas composições, os melhores resultados são apresentados na Tabela 7.

A mistura de serragem (*Deodar*) com casca de pinheiro (80:20) com 7% de lignina

sulfonada e 4% de fenol-formaldeído deram os melhores resultados (MOR = 15,2 MPa).

O importante desta pesquisa é o aproveitamento da casca de madeira, já que na fabricação comercial de chapas de fibras e chapas de partículas a madeira é utilizada sem casca.

Tabela 7: Propriedades de chapa de partículas feitas usando-se diferentes composições (CHAWLA et al., apud ARENDS, 1985)

material usado	composição do adesivo	densidade kg/m <sup>3</sup>	MOR MPa	absorção de água %		inchamento em espessu- ra %	
				1 h.	24 h.	1 h.	24 h.
SF 60% + CP 40%	3% FF	1000	9,4	20	76	19	23
SF 70% + CP 30%	4% FF	1000	10,6	74	114	50	70
SF 80% + CP 20%	5% FF	1000	11,2	64	92	62	82
SF 95% + CA 5%	4% FF	1000	9,6	55	69	20	37
SD 80% + CP 20%	6% LS + 4% FF	1000	15,2	7	14	13	24
SD 70% + CP 30%	7% LS + 3% FF	920	7,6	5	23	4	24
SD 60% + CP 40%	8% LS + 2% FF	1000	8,0	1	19	3	19
SD 50% + CP 50%	9% LS + 1% FF	940	8,0	11	26	12	36
SD 50% + CP 50%	10% LS	940	8,1	14	-	13	-
SF – serragem ( <i>Fir</i> ) CP – casca de pinheiro CA – casca de arroz SD – serragem ( <i>Deo-</i> <i>dar</i> )	FF – fenol-formaldeído LS – lignina sulfonada						

Além disso, ARENDS (1985), também comenta sobre outros testes envolvendo serragem e agro resíduos (Tabela 8). Nota-se que o melhor resultado (MOR = 19,4) é conseguido somente com alta quantidade de adesivo (15% de fenol-formaldeído).

Na Rússia pesquisadores usaram uma mistura de serragem úmida com o produto resultante da policondensação e cura de resinas fenol e uréia-formaldeído e ácido *sulpho-naphthenic* para preparar chapas e outros produtos por prensagem a temperaturas de 60 a 70°C e a pressões de 0,3 a 0,5 MPa, sendo que eles prometem um produto que não altera suas dimensões, mesmo após seis meses de imersão em água (ARENDS, 1985).

O teste de ligação interna (tração perpendicular a chapa) é mais conveniente que o teste de cisalhamento para determinar o grau de adesão entre as partículas de madeira em

Tabela 8: Propriedades de compósitos a partir de agro resíduos particulados (CHAWLA, apud ARENDS, 1985)

material usado	adesivo	densidade kg/m <sup>3</sup>	MOR MPa	absorção de água %		inchamento em espessu- ra %	
				1 h.	24 h.	1 h.	24 h.
SF + CM	15% FF	1080	19,4	-	20	-	13
SF + CM + CA	10% FF	1020	8,6	-	34	-	17
SF + CA + FI	5% FF	1000	10,0	10		7	-
SF-serragem ( <i>Fir</i> ) CM-casca de amendoim CA-casca de arroz FI- fibra de amendoim		FF-fenol-formaldeído					

chapas de partículas e em testes realizados após vários ciclos de umedecimento e secagem a resistência de ligação interna dependeu, sobretudo do tamanho e forma das partículas de madeira usadas para fabricar a chapa (SAITO e SUGIYAMA, 1980 apud ZIEGLER, 1981).

LEHMANN (1974), apud SUO e BOWYER (1995), propôs uma equação de regressão com coeficiente de determinação de 0,885 (Equação 9).

$$LI = 6.894,76[-86,10 + 7,626.CR - 3,99.CP + 870,5.EP + 130,5.d] \quad (9)$$

Onde :

LI = ligação interna (Pa);

CR = conteúdo de resina (% );

CP = comprimento da partícula (cm);

EP = espessura da partícula (cm);

d = densidade específica aparente da chapa.

Outra correlação possível é entre a ligação interna e a razão de compactação (Equação 10), quanto maior a razão de compactação melhor o contato entre as partículas e assim teremos

melhor adesão (RICE e CAREY, 1978 apud SUO e BOWYER, 1995).

As Equações 9 e 10 foram usadas por SUO e BOWYER (1995) para simular a ligação internas de chapas de partículas, os resultados preditos variaram daqueles obtidos experimentalmente. O que demonstra que existem fatores não computados na simulação, talvez ligados a heterogeneidades da estrutura dos compósitos.

$$LI = -50,0 + 157,3(RC) \quad (10)$$

Onde:

LI = ligação interna (psi);

RC = razão de compactação (Equação 1).

## 2.5 SIMULAÇÃO E MODELAGEM DOS COMPÓSITOS PARTICULADOS

Os modelos fundamentais de materiais de engenharia podem unificar as interações do tempo, temperatura, e conteúdo de umidade com a resposta não linear da madeira sob compressão. De maneira que os colchões dos compósitos de madeira podem ser visto como um material celular, ou ainda, o comportamento da madeira pode ser governado pelo comportamento dos polímeros, acoplado com a geometria estrutural da anatomia celular. A conformidade da madeira com estas teorias gerais dos materiais abrem avenidas para a pesquisa ligada a compósitos de madeira totalmente engendrados. (WOLCOTT et al., 1994).

A experiência tem mostrado que as propriedades das chapas de partículas podem ser descritas razoavelmente bem por técnicas de simulação por modelagem com tal precisão que os resultados podem ser aplicados na pesquisa e produção (SUO e BOWYER, 1995).

SUO e BOWYER (1995), modelaram a formação do gradiente de densidade vertical

em chapas de partículas através da simulação da prensagem à quente. Foram usados parâmetros que envolveram o gradiente de temperatura, gradiente de conteúdo de umidade, modelados a partir da teoria de transferência de calor e massa com fluxo em estado não estacionário usando-se o método das diferenças finitas.

WOLCOTT et al. (1994), propuseram a modelagem experimental usando-se colchões de fibras e filmes poliméricos sintéticos.

SUO e BOWYER (1995), modelaram o comportamento das propriedades de resistência da chapa de partículas estrutural. O módulo de elasticidade foi modelado baseando-se no gradiente vertical de densidade, enquanto que o módulo de resistência foi baseado nos valores do módulo de elasticidade das diversas camadas da chapa. A ligação interna foi modelada através de uma equação de regressão, montada a partir da Equação 9 e 10.

LENTH e KAMKE (1996), investigou a consolidação do colchão da chapa de lascas modelando a conformação do colchão usando teorias de materiais celulares. A modelagem foi comparada com resultados experimentais.

LANG e WOLCOTT (1996a), desenvolveram um modelo baseado na mecânica dos sólidos para prever o comportamento da tensão-deformação estática de um colchão de lascas de madeira formado aleatoriamente durante a operação de prensagem. Os resultados preditos se mostraram de acordo com os obtidos experimentalmente.

WINISTORFER et al. (1996), realizou modelagem do perfil do gradiente vertical de densidade através da análise de regressão não paramétrica em painéis de lascas orientadas. Ao mesmo tempo eles compararam os perfis de chapas obtidas em laboratório variando o nível de umidade das lascas (4, 8 e 12%) e a taxa de fechamento da prensa (20, 60 e 100 s).

STAHL et al. (1997) simularam a microestrutura de compósitos madeira-cimento

através de uma malha. O modelo de elemento finito tridimensional permitiu construir diagramas tensão-deformação definindo qual o tipo de heterogeneidade que gerou a ruptura.

XU (1999), simulou a distribuição vertical de densidade, determinando a influência do tipo da distribuição vertical de densidade sobre o módulo de elasticidade, indicando qual é a posição do pico da intensidade de densidade ao longo da espessura da chapa que maximiza o módulo de elasticidade na flexão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATÉRIAS-PRIMAS

Neste subcapítulo serão descritas as matérias-primas utilizadas, ou seja, o resíduo de madeira, as fibras vegetais usadas como reforço e a resina utilizada.

##### 3.1.1 Resíduo de madeira

O resíduo de madeira utilizado foi cedido pela empresa Artefama S/A, que tem sua filial localizada no bairro Lençol em São Bento do Sul, Santa Catarina.

Nesse local, a madeira seca, da espécie *Pinus spp*, é preparada para a fabricação de painéis colados. Para essa finalidade, as máquinas utilizadas nessa filial são: plaina moldureira, que usina as peças de madeira nas quatro faces, geralmente reduzindo a espessura de 25 para 20 mm e destopadeiras para acertar os topos.

Certamente, a plaina moldureira, é a máquina de usinagem que mais produz resíduo particulado de madeira seca durante a fabricação de móveis a partir de painéis de madeira maciça. Que é o caso da grande maioria das empresas do pólo moveleiro de São Bento do Sul.

Verifica-se que a produção de resíduos neste caso é de cerca de 25%, considerando apenas o acabamento na espessura.

- Preparação

O resíduo particulado de madeira foi dividido por peneiramento em duas frações. As partículas denominadas de partículas grossas (PG), que ficaram retidas na peneira com malha de 2,35 mm. As partículas denominadas de partículas finas (PF), que passaram na peneira com malha de 2,35 mm e ficaram retidas na peneira com malha de 1,20 mm.



A peneira mais fina (malha de 1,2 mm) foi utilizada para retirar as partículas muito pequenas.

- Caracterização

As partículas foram caracterizadas na sua forma e tamanho através de medições diretas e através de uma classificação por peneiras.

O aspecto das partículas grossas pode ser visto na Figura 6.

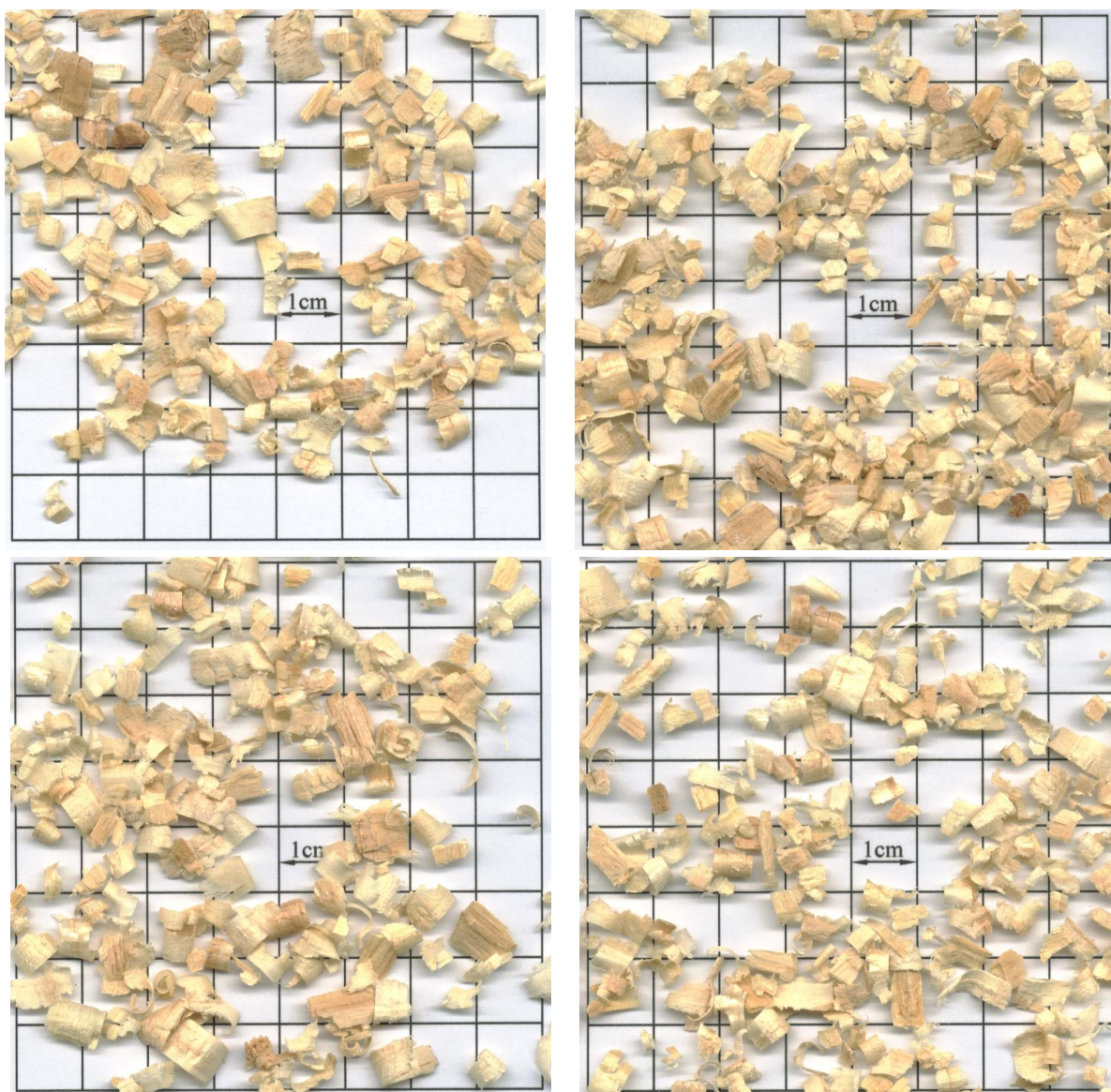


Figura 6: Detalhe das partículas grossas

Podemos verificar a forma côncava das maravalhas, fato determinante da baixa re-

sistência de chapas aglomeradas feitas a partir de maravalhas.

Além disso, a usinagem da madeira também proporciona partículas de espessura variada, relativamente finas, como podemos notar na Tabela 9, que resume as dimensões de 30 partículas tomadas aleatoriamente.

Tabela 9: Dimensões médias das partículas grossas

Dimensão	Valor médio (mm)
comprimento (paralelo as fibras)	7,5
largura (perpendicular as fibras)	4,3
espessura	0,41

Devido a espessura média de 0,41 mm e a largura média de 4,3 mm, medida feita perpendicularmente as fibras, as partículas grossas mantêm pouca resistência no sentido da largura, tanto a esforços de tração quanto de flexão, proporcionando a fácil ruptura nesta direção. A ruptura também deve ser influenciada pelas fissuras nas partículas no sentido do comprimento.

A concavidade acontece no sentido do comprimento das partículas, ou seja, no sentido paralelo às fibras, que é o sentido do corte durante a operação de usinagem.

Existe uma variação na espessura das partículas, principalmente nas mais compridas, no sentido do comprimento (perpendicular às fibras), no caso o valor apresentado na Tabela 9 foi determinado para cada partícula com duas medições, uma na parte mais fina e outra na parte mais grossa, os valores variam de 0,17mm na parte mais fina para 0,65 mm na parte mais grossa (valores médios).

As partículas finas apresentam relativamente uma maior homogeneidade, o que podemos constatar na Figura 7.

As partículas grossas e finas foram submetidas a uma classificação por peneiras. O resultado da variação da granulometria pode ser visto na Tabela 10. A média apresentada

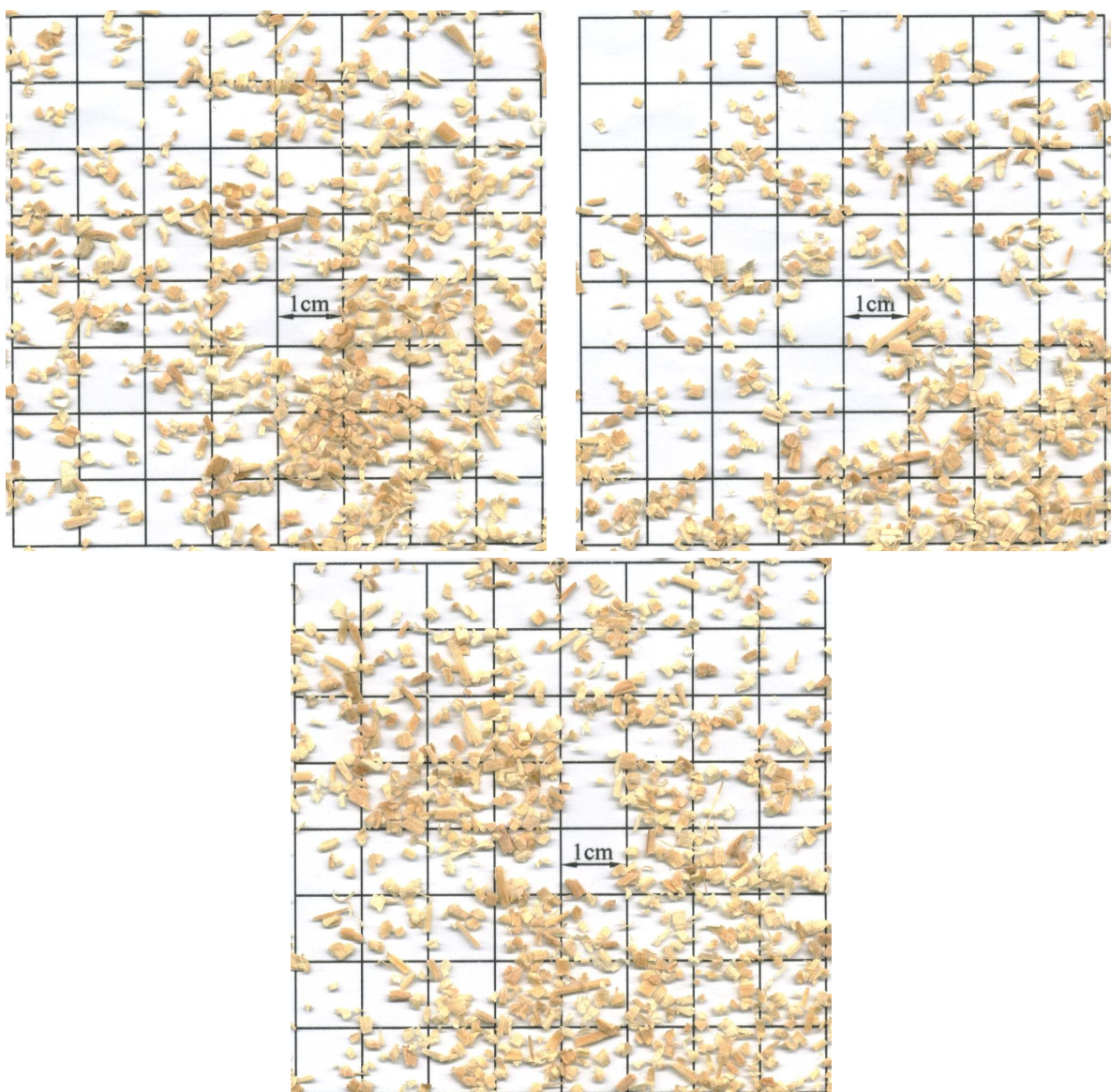


Figura 7: Detalhe das partículas finas

é o resultado de cinco amostras.

Com os resultados apresentados na Tabela 10 podemos notar que o peneiramento inicial dividindo as partículas em duas frações foi realizado de maneira adequada, visto que 98,84% das partículas grossas ficaram retidas acima da peneira com malha de 1,70 mm.

Tabela 10: Porcentagem de partículas retinas nas diferentes peneiras

Amostra	Malha (mm)						
	4,75	3,36	1,70	1,00	0,50	0,25	0,00
partículas grossas	12,14	28,04	58,66	1,16	0,00	0,00	0,00
partículas finas	0,00	0,00	14,53	62,86	21,20	1,41	0,00

### 3.1.2 Fibras vegetais

Com objetivo de reforçar as chapas aglomeradas a partir de maravalhas de madeira, foram incorporadas partículas no formato de fibras.

Foram utilizados quatro tipos de fibras: fibra de sisal, fibra da bananeira, fibra de madeira e fibra da vassoura.

#### • Fibra de Sisal

As primeiras plantações de sisal foram realizadas pelos Maias no México antes da chegada dos Europeus, o nome sisal se origina do porto da cidade de Yucatan no México, que quer dizer água fresca (GHAVAMI, 2001).

A produção em larga escala do sisal começou em 1888 e após suas plantações foram propagadas pelas regiões tropicais e sub-tropicais. Existem 57 espécies conhecidas atualmente. As fibras de sisal são extraídas das folhas da planta, que variam seu tamanho entre 6 a 10 cm na largura e 50 a 250 cm no comprimento dependendo da espécie, clima e solo da plantação (GHAVAMI, 2001).

O comprimento da fibra técnica varia de 60 a 120 cm. O sisal é usado como fio para atar as colheitas, como cordel, como barbante de embalagem, como redes, além de passadeiras e tapetes e muitos outros usos. A fibra de sisal possui alta resistência ao desgaste proporcionando artigos resistentes (ERHARDT et al., 1976).

- Caracterização

A Tabela 11 resume as propriedades mecânicas e físicas da fibra de sisal, os valores apresentados são o maior e menor valor, além da média e o coeficiente de variação (CV) (GHAVAMI, 2001).

Tabela 11: Propriedades físicas e mecânicas da fibra de sisal

Propriedade	Mínima - Máxima	Média - CV
Diâmetro (mm)	0,08 - 0,30	0,12 - 23,8
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,75 - 1,07	0,90 - 8,90
Absorção de água após imersão por 5 minutos (%)	67,00 - 92,00	82,00 - 14,50
Absorção de água - saturação (%)	190,00 - 250,00	230,00 - 16,0
Resistência a Tração (MPa)	227,80 - 1002,30	577,50 - 42,66
Módulo de Elasticidade (GPa)	10,94 - 26,70	19,00 - 29,50
Alongamento na ruptura (%)	2,08 - 4,18	3,00 - 29,15

WEGST (1996), indica como limite de resistência a tração para o sisal a faixa de valores de 507 a 855 MPa, com uma densidade de 1,4 g/cm<sup>3</sup>, além do módulo de elasticidade de 24 GPa.

A densidade da fibra de sisal é maior que a densidade do *Pinus spp.* Portanto a razão de compactação (RC - Equação 1) diminuirá com a adição das fibras de sisal, já que a densidade final do compósito é fixa (0,75 g/cm<sup>3</sup>).

- Origem

A fibra de sisal utilizada neste trabalho foi doada pelo Grupo Sisal da Paraíba. A fibra foi processada com a umidade original, em média de 16%.

- Microestrutura

A Figura 8 apresenta a microestrutura da fibra de sisal através de micrografias obtidas num Microscópio Eletrônico a Varredura. As fibras foram fixadas no porta amostra com

uma fita dupla-face de carbono e recobertas com ouro para o trabalho no microscópio.

Podemos notar pelas Figuras 8(a), 8(b), 8(c) e 8(d) que o diâmetro da fibra se encontra próximo de  $200 \mu\text{m}$ , que está de acordo com o apresentado na Tabela 11.

A Figura 8(d) mostra bem o aspecto do feixe de fibras, nota-se que a fratura não provocou a separação das fibras componentes do feixe. As células tem um aspecto bastante regular, arredondadas, com um diâmetro próximo de  $20 \mu\text{m}$ , e parede relativamente grossa, cerca de  $5 \mu\text{m}$ .

O aspecto fibrilado da fibra de sisal fica evidenciado na Figura 8(a), estas estrias no sentido longitudinal exercem influência positiva na ancoragem das fibras. Além disso a seção transversal irregular (Figuras 8(b) e 8(c)) pode facilitar também a ancoragem (SAVASTANO JR e AGOPYAN, 1999).

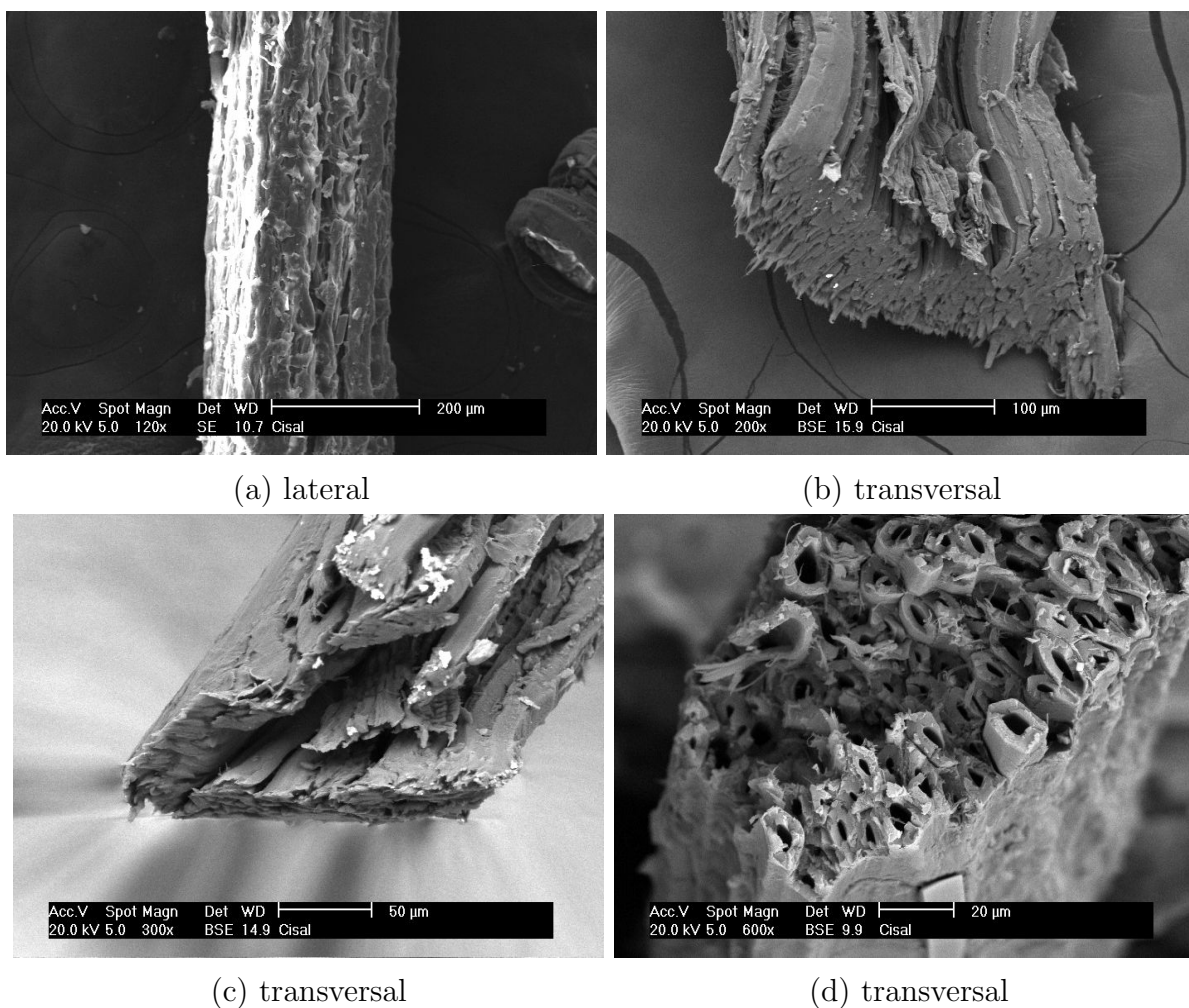


Figura 8: Detalhe da microestrutura da fibra de sisal

#### • Fibra da Vassoura

A vassoura, ou sorgo-vassoura (*Sorghum*), pertence a família das gramíneas. É uma planta anual, sem rizomas, até mais de 4 m de altura, originária da Ásia e esparsamente cultivada no Estado de Santa Catarina, como espécie subespontânea, pode ser encontrada nos terrenos abandonados de cultivo, na beira de caminhos e nas proximidades das habitações sendo principalmente cultivado para a fabricação de vassoura (SMITH et al., 1982).

- Origem

O material utilizado foi retirado diretamente de vassouras. A umidade das fibras de vassoura no recebimento variou de 16 a 20%. As fibras foram cortadas com 2 cm de comprimento. Após o corte o material foi peneirado, utilizando-se as fibras que passaram na peneira com malha 2,35 mm.

A fabricação de vassouras durante o acabamento das cerdas deve produzir uma quantidade viável para aproveitamento, ainda não existem dados confiáveis destes resíduos. Além disso não existe caracterização das propriedades mecânicas e físicas das cerdas da vassoura.

- Microestrutura

A Figura 9 apresenta a microestrutura da fibra de vassoura através de micrografias obtidas num Microscópio Eletrônico a Varredura.

Podemos notar pelas Figuras 9(a), 9(b), 9(c) e 9(d) que o diâmetro da fibra é bastante variável, as amostras micrografadas apresentam um valor médio de  $400\mu\text{m}$ .

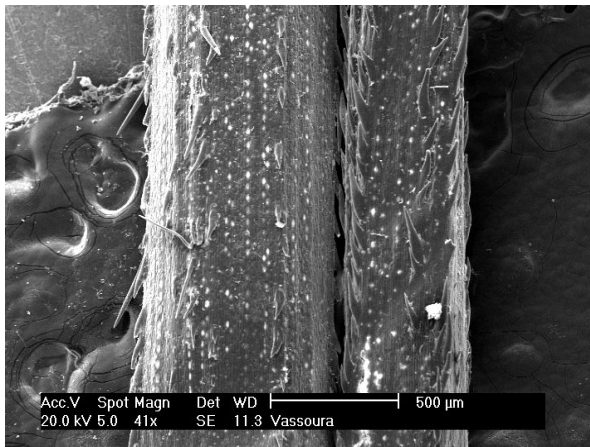
A Figura 9(c) e 9(d) mostra bem o aspecto do feixe de fibras. As células são arredondadas, com um diâmetro próximo de  $10\mu\text{m}$  (Figura 9(c)), e parede relativamente fina quando comparada com a fibra de sisal.

A grande diferença da fibra de vassoura é a sua característica superficial, ou seja, os pequenos espinhos (Figura 9(e)) devem facilitar bastante a ancoragem das fibras.

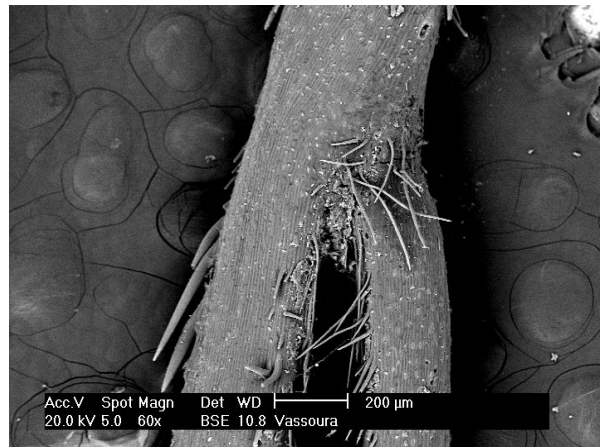
- **Fibra de Madeira**

As fibras de madeira são utilizadas para a fabricação de chapas de fibras (Seção 2.3.4), bem como para fabricação de papel.

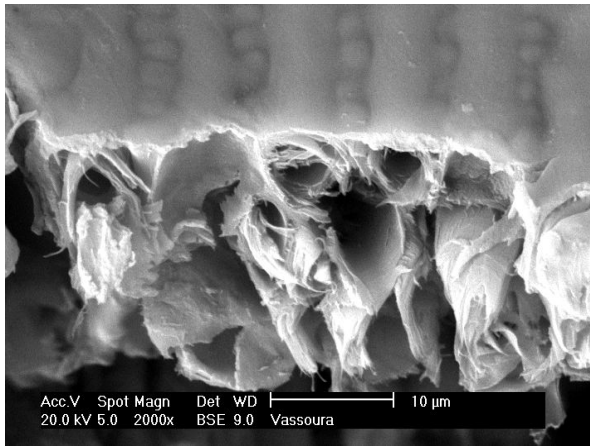




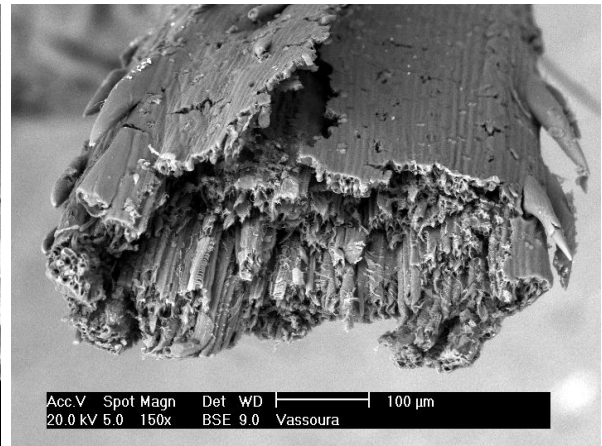
(a) lateral



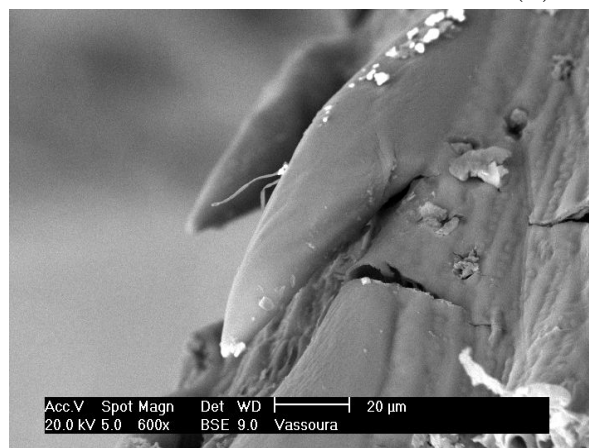
(b) lateral



(c) transversal



(d) transversal



(e)

Figura 9: Detalhe da microestrutura da fibra da vassoura

- Origem

A fibra de madeira utilizada foi doada pela empresa fabricante de MDF, Tafisa, situada no Paraná. A utilização da fibra foi feita com a umidade original, em média de 10%.

- Microestrutura

A Figura 10 apresenta a microestrutura da fibra de madeira através de micrografias obtidas num Microscópio Eletrônico a Varredura.

Podemos notar pelas Figuras 10(a) e 10(b) que o diâmetro da fibra se encontra próximo de  $25\mu\text{m}$ .

Já a Figura 10(c) mostra um feixe de fibras, podemos notar as pontuações que podem facilitar a aderência da fibra na matriz em compósitos.

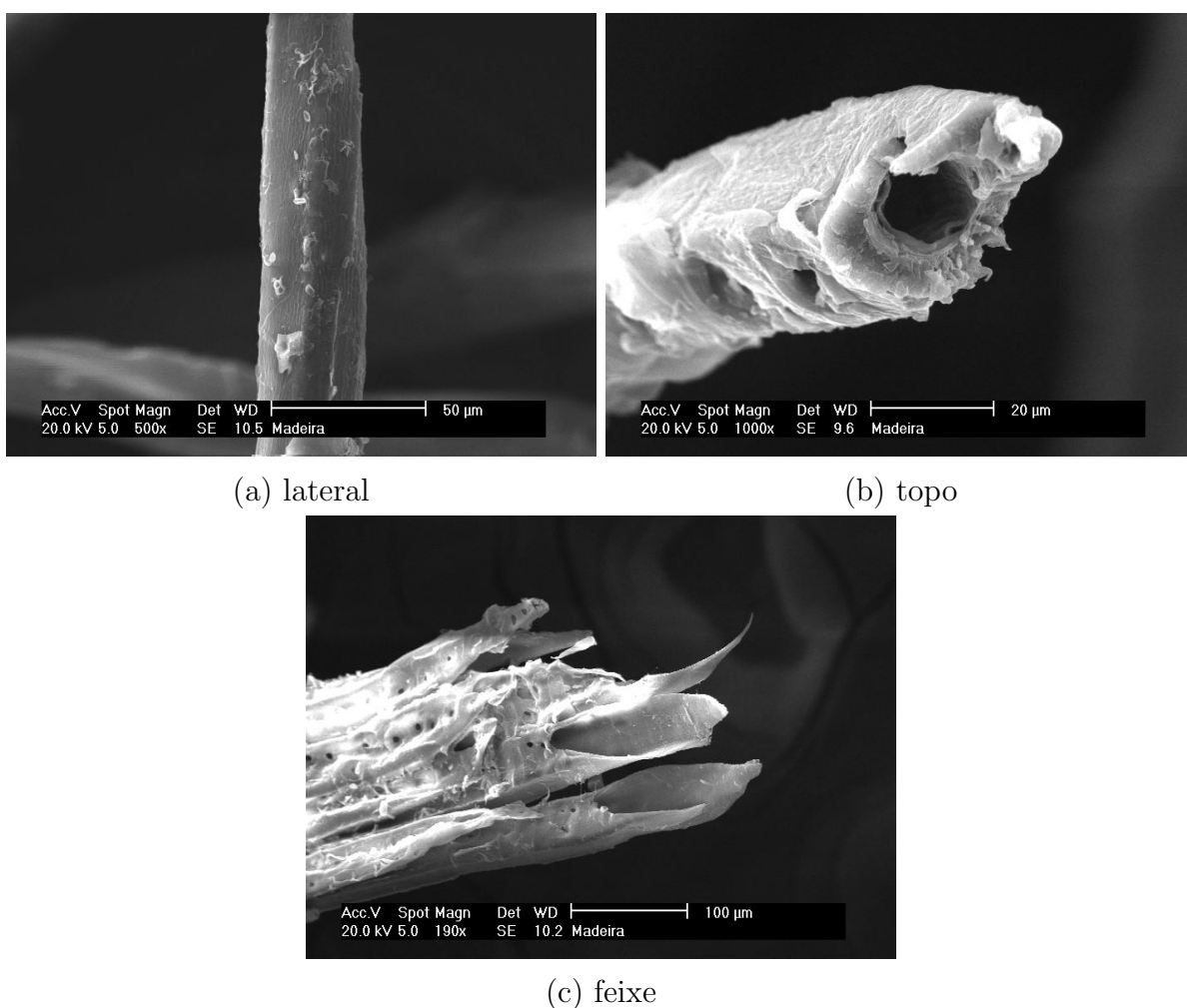


Figura 10: Detalhe da microestrutura da fibra de madeira

- **Fibra da Bananeira**

A banana é uma fruta tropical sendo produzida praticamente o ano todo. Originária do Sudeste Asiático, disseminada na América Latina a partir de 1516. No comércio mundial de frutas, a banana apresenta o maior volume de vendas (SOUZA et al., 1995).

Cada pseudocaule da bananeira produz um cacho de fruto. Após a colheita, o pseudocaule é cortado e torna-se muitas vezes um resíduo incomodo, para o produtor.

Em 1984, foram contabilizados 576 milhões de cachos colhidos no Brasil (SOUZA et al., 1995).

Não existe ainda um aproveitamento comercial em larga escala para a fibra do pseudocaule da bananeira, embora seja uma fibra historicamente utilizada para fabricação de arreios e outros artefatos utilizados na lavoura. Na nossa região (Nordeste Catarinense) a fibra da bananeira vem sendo utilizada para artesanato (GROTH, 2000).

- **Caracterização**

Existe uma variação muito grande das propriedades indicadas na bibliografia para as células e fibras de bananeira, isto acontece devido ao número variado das espécies e variações das propriedades das fibras ao longo do pseudocaule.

A Tabela 12 resume as propriedades físicas e mecânicas da fibra da bananeira de várias referências.

A densidade da fibra da bananeira é maior que a densidade do *Pinus spp.* Portanto a razão de compactação (RC - Equação 1) diminuirá com a adição das fibras de bananeira, já que a densidade final do compósito é fixa ( $0,75\text{g/cm}^3$ ).

- **Origem**

A fibra de bananeira utilizada no trabalho foi conseguida após desfibramento manual.

Tabela 12: Propriedades físicas e mecânicas da fibra da bananeira

Propriedade	(IJIRA, 2002)	(TUD-TNO, 2002)	(BISWAS et al., 2002)	(WEGST, 1996)
Comprimento das células (mm)	0,90-4,00			
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,35	1,5	1,35	1,3
Umidade de equilíbrio (%)(UR 65%)	15			
Umidade de equilíbrio (%)(UR 100%)	36			
Resistência a Tração (MPa)				791
Angulo das microfibrilas			11	
Módulo de elasticidade (GPa)			8-20	30
Alongamento (%)			1,0-3,5	2,1

- Desfibramento

O pseudocaule verde da bananeira produz 3% de fibras com um desfibramento mecânico (Yu, 2000).

O processo de desfibramento manual é detalhado na Figura 11

Inicialmente o pseudocaule da bananeira é cortado em pedaços com comprimento próximo de 50 cm para facilitar a manipulação. Após o pedaço de pseudocaule é desfolhado (Figura 11(a)), cada folha é cortada em tiras com aproximadamente 4cm de largura (Figura 11(b)).

Cada tira é separada em três camadas, a camada interna produz fibras muito finas, não apropriadas e a camada central na forma de uma "renda" também é descartada (Figura 11(c)). A camada externa de cada tira é raspada com uma lâmina para retirar as fibras (Figura 11(d)). Após as fibras são secas ao ar (Figura 11(e)), para depois serem secas numa estufa até atingir 10% de umidade.

A secagem ao ar não é suficiente para prevenir o aparecimento de fungos, sendo necessário então a secagem artificial numa estufa. Após a secagem as fibras eram acondicionadas em sacos plásticos evitando a absorção da umidade do ar.



(a) corte do pseudocaule



(b) corte das tiras



(c) divisão das tiras em camadas



(d) raspagem das fibras



(e) secagem das fibras

Figura 11: Detalhe do processamento para obtenção das fibras da bananeira

- Microestrutura

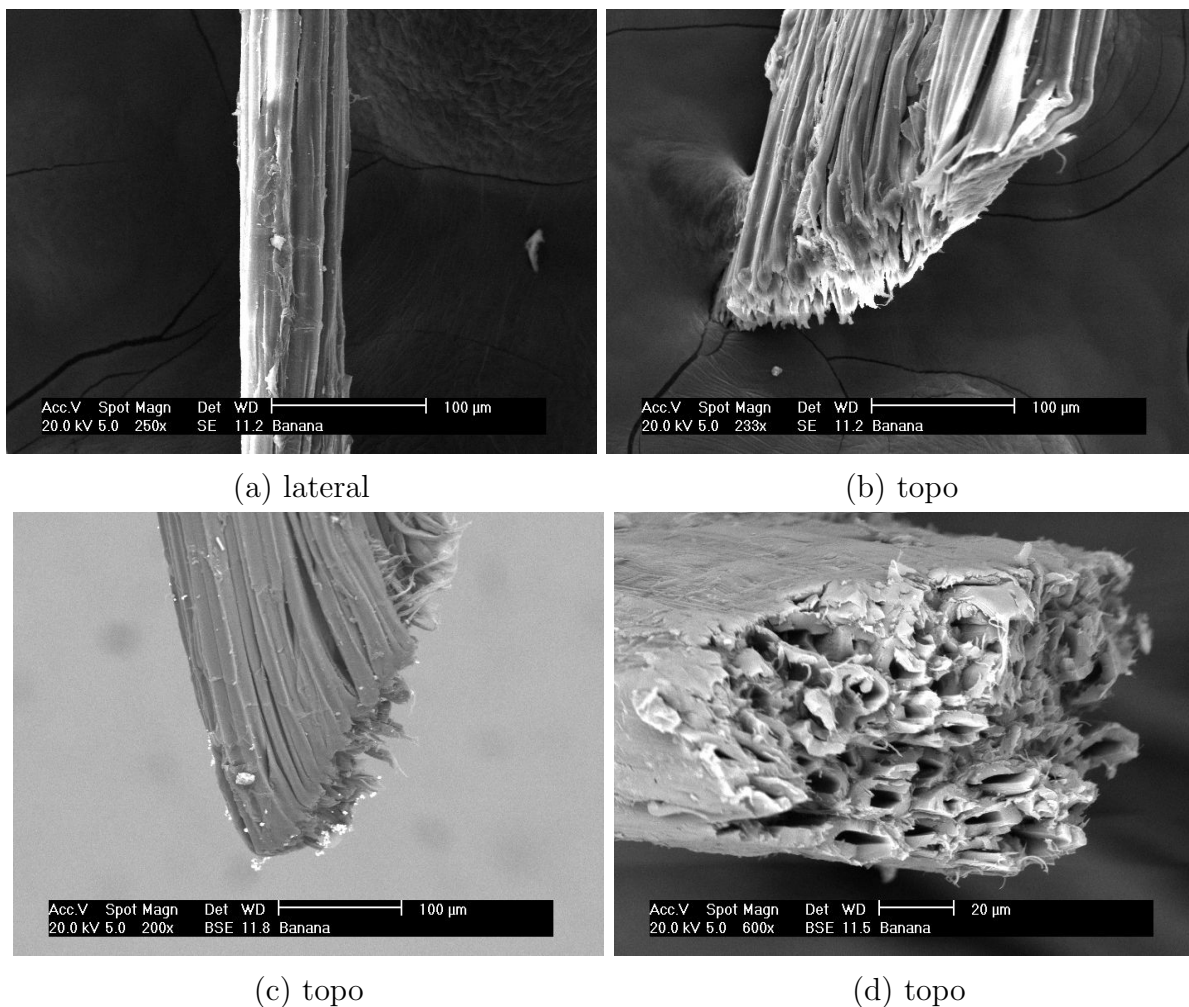


Figura 12: Detalhe da microestrutura da fibra da bananeira

A estrutura das fibras da bananeira se assemelha em muito a fibra de sisal. O diâmetro das fibras obtido através das micrografias ficou em torno de  $150 \mu\text{m}$ .

É importante comentar que o diâmetro das fibras de bananeira depende muito da região do pseudocaule. Quanto mais interno e mais perto da copa, mais finas são as fibras obtidas.

A estrutura assemelhada das fibras de sisal e de bananeira é traduzida pelas semelhanças nas propriedades mecânicas (fibra de sisal -Tabela 11)(fibra de bananeira -Tabela 12).

### 3.1.3 Resina

A quantidade de resina foi fixada em 10%, tomando como base o peso seco do material lignocelulósico.

A resina utilizada foi uréia-formaldeído (Royalfor 110) cedida pela Royalplás.

O fabricante indica as seguintes propriedades referente à resina (Tabela 13).

Tabela 13: Propriedades da resina Royalfor 110

Aspecto	Líquido, leitoso, opaco, com odor característico
PH a 25 ° C	7,8 a 8,6
Viscosidade Brookfield a 25 ° C	250 a 450
Densidade à 25 ° C (g/cm <sup>3</sup> )	1.275 a 1.285
Gel-Time a 98 ° C (min.)	40 a 60
Formol Livre	0 a 0,5
Sólidos a 105 ° C p/ 2 horas (%)	64 a 66

## 3.2 PROCESSAMENTO

As etapas de processamento foram além do peneiramento do material: enresinamento, formação, pré-prensagem, prensagem, corte dos corpos-de-prova.

### 3.2.1 Enresinamento

Na primeira fase deste trabalho o enresinamento foi realizado num latão onde as partículas eram continuamente tombadas durante a pulverização da resina. Objetivando a melhora do processo de enresinamento bem como na mistura do componente particulado com as fibras, foi fabricado um misturador baseado em CHRISTENSEN e ROBITSCHKE (1975).

- Fabricação do misturador

O processo de enresinamento, mistura da resina com as partículas (maravalhas e fibras), é fundamental na fabricação de chapas aglomeradas.

A resina deve ser espalhada sobre a superfície das partículas de uma forma homogênea, de modo a otimizar a adesão.

Durante o enresinamento, pode ser realizada a mistura de diferentes tipos de partículas. Neste trabalho a mistura de maravalhas e fibras, que é de vital importância, foi realizada durante o enresinamento.

Em virtude disso, foi necessária a fabricação de um misturador adequado.

Detalhes do misturador podem ser vistos na Figura 13

O misturador é impulsionado através de um motor com um redutor de velocidade variável de 50 a 180 rotações por minuto (Figura 13(a)).

As partículas eram acomodadas num tambor fechado de alumínio com volume igual a  $0,06 \text{ m}^3$  (60 litros) construído a partir de uma panela (Figura 13(b)). Nas paredes da panela foram soldados algumas aletas que favorecem o "turbilhamento" das partículas.

A mistura das partículas é realizada através de pás ligadas num eixo central (Figura 13(c) e Figura 13(d)).

As Figuras 13(e) e 13(f) oferecem uma visão geral do equipamento.

Durante o enresinamento as fibras tendem naturalmente a se aglomerar.

Em decorrência disso, foram dispostos nas paredes da panela alguns ganchos com 2 cm de comprimento que desintegram os grumos.

A velocidade de rotação do misturador que favorece a mistura depende do material, principalmente do tipo de fibra (diâmetro) e do seu comprimento.

Para obter a uniformização do enresinamento, possibilitando a transferência de re-





(a) motor com variador de velocidade



(b) panela



(c) eixo com as pás



(d) eixo posicionado



(e) detalhe geral



(f) detalhe geral

Figura 13: Detalhe do misturador

sina entre as partículas, após a pulverização do adesivo, o misturador foi mantido em funcionamento por mais 15 minutos.

- Efeito do misturador sobre as partículas

O processo de enresinamento mecânico causou alterações na forma e no tamanho das partículas, além do objetivo original da pós-mistura, ou seja, homogeneizar a distribuição da resina nas partículas.

A concavidade natural das maravalhas grossas foi em parte eliminada com o processo de pós-mistura. Detalhes das partículas grossas após o processo de pós-mistura podem ser vistas na Figura 14.

A alteração na concavidade das partículas possivelmente se deve ao fato da umidificação durante o enresinamento, isso possibilita que as tensões residuais da usinagem, que provocam a concavidade, sejam aliviadas devido a diminuição da resistência da madeira com o acréscimo da umidade.

Qualquer que seja o processo de enresinamento envolvendo a pulverização de resina dissolvida em água, deve provocar o mesmo efeito. O ganho no processo com a pós-mistura, é que as faces côncavas das partículas que recebem menos resina no início do enresinamento, podem com a fricção das partículas receber adesivo daquelas faces convexas que receberam uma quantidade maior de adesivo.

Para verificar a possível modificação no tamanho das partículas durante o processo de pós-mistura foi realizada uma classificação através de peneiras.

As dimensões das malhas utilizadas foram: 4,75 - 3,36 - 1,70 - 1,00 - 0,50 - 0,25 - 0,00 mm. O peso de cada amostra foi de 10,00 gramas, o reostato da máquina foi posicionado na intensidade 20 e o tempo de classificação foi de 5 minutos.

O resultado da variação da granulometria pode ser visto na Tabela 14, para efeito de

comparação está presente também a granulometria das partículas antes do enresinamento.

A média apresentada é o resultado de cinco amostras.

Como podemos notar as partículas grossas foram rompidas pelo processo de pós-mistura, visto o aumento relativo de finos. Por outro lado, o processo de pós-mistura teve pouco efeito no tamanho das partículas finas.

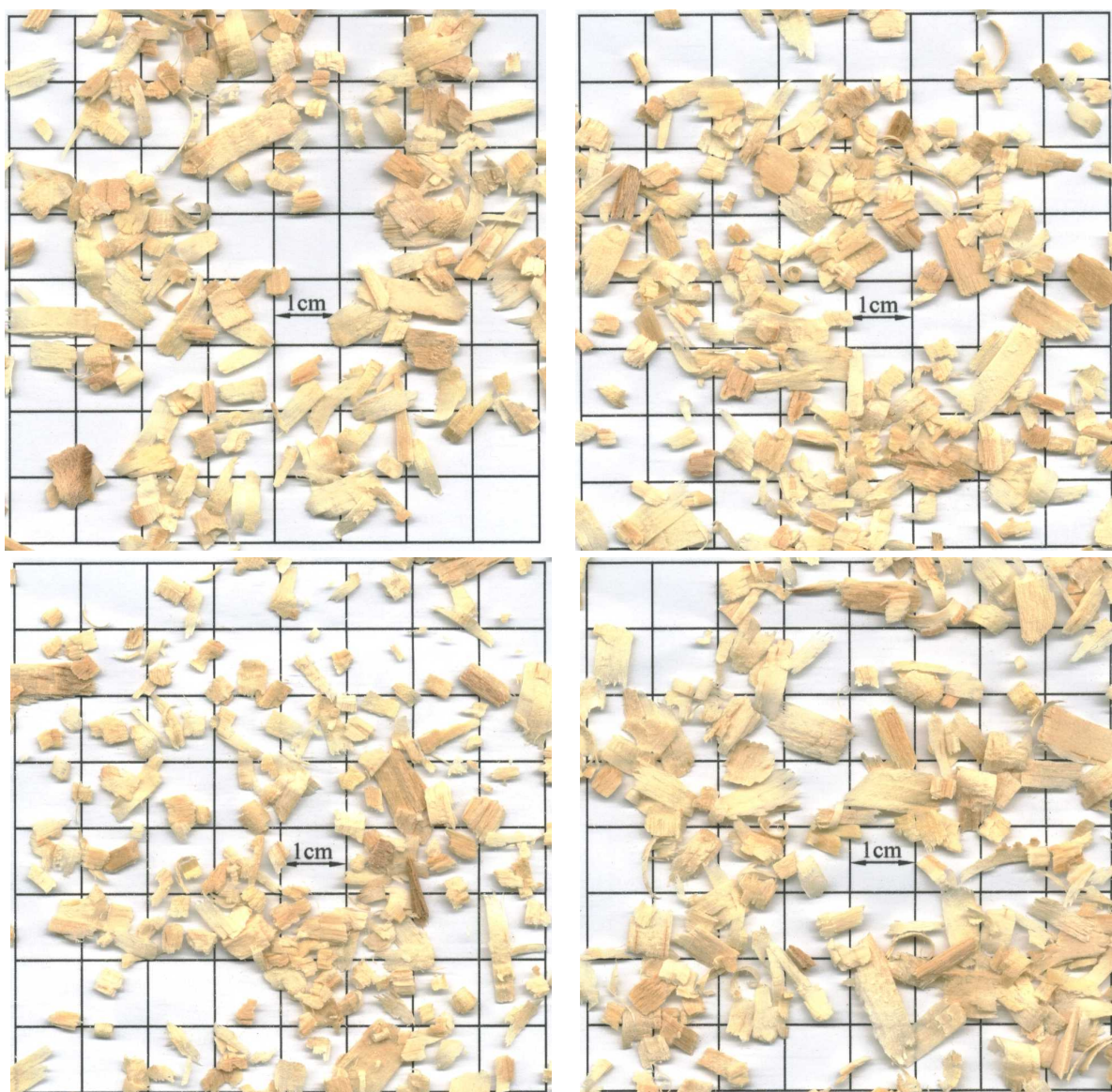


Figura 14: Detalhe das partículas grossas enresinadas no pós-misturador

Tabela 14: Porcentagem de partículas retinas nas diferentes peneiras

Amostra	Malha (mm)						
	4,75	3,36	1,70	1,00	0,50	0,25	0,00
partículas grossas	12,14	28,04	58,66	1,16	0,00	0,00	0,00
partículas grossas (após a mistura)	9,87	26,77	57,13	5,04	1,19	0,00	0,00
partículas finas	0,00	0,00	14,53	62,86	21,20	1,41	0,00
partículas finas (após a mistura)	0,00	0,00	14,52	61,35	21,25	2,88	0,00

A confirmação visual de que o processo de enresinamento não modificou as partículas finas pode ser feito na Figura 15.

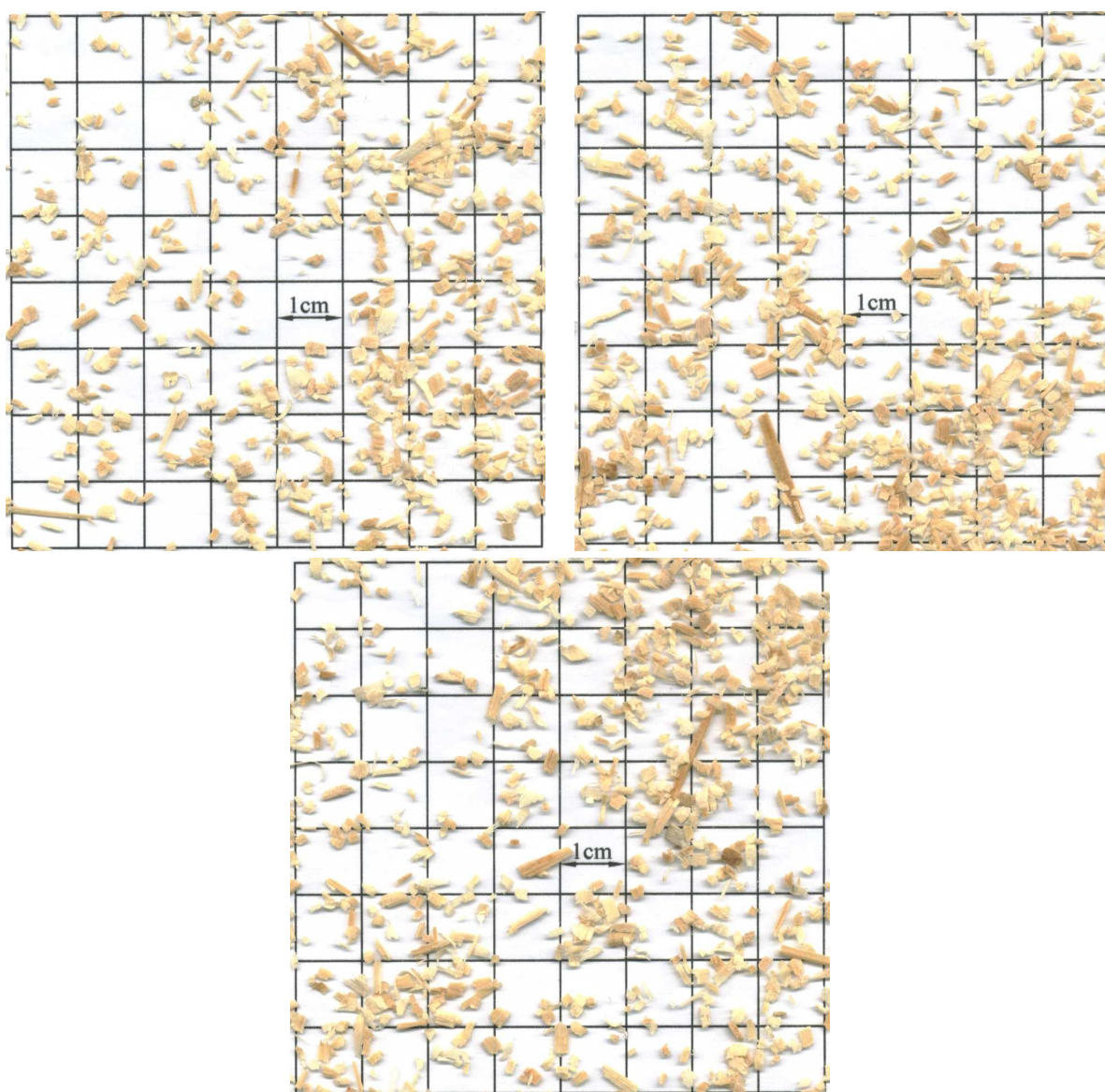


Figura 15: Detalhe das partículas finas enresinadas no pós-misturador

### 3.2.2 Formação

A formação do colchão de partículas foi feita manualmente dentro de uma caixa com dimensões finais do colchão, ou seja, 300x300 mm (Figura 16).

Após a formação, as partículas condicionadas na caixa de formação foram submetidas a uma pré-prensagem com aplicação de uma carga de 30.000 N.

O colchão pré-prensado foi colocado entre duas chapas de aço inox com 1 mm de espessura, que auxiliam o transporte até a prensa e favorecem o acabamento superficial da chapa aglomerada.

Neste momento, foi posicionado o batente com dimensão igual a espessura final da chapa (10 mm), para a parada durante o fechamento da prensa.



(a) caixa formadora



(b) dispositivo para a pré-prensagem

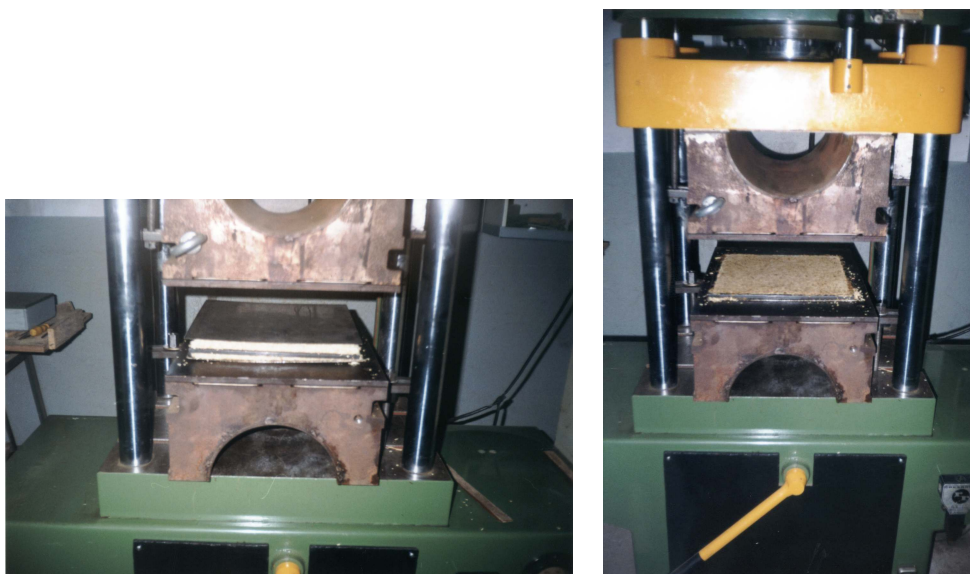


(c) colocação das chapas de aço inox e batente

Figura 16: Detalhe da formação do colchão

### 3.2.3 Prensagem

A consolidação do colchão de partículas foi feito através de prensagem por compressão com chapas aquecidas eletricamente a uma temperatura de  $160^{\circ}\text{C}$  por um tempo de 10 minutos. Estes parâmetros de prensagem foram mantidos constantes para todas as amostras.



(a) entrada na prensa

(b) saída da prensa

Figura 17: Detalhe da prensagem

### 3.2.4 Corte dos corpos de prova

Após o processamento das chapas, destas foram extraídos os corpos de prova para a caracterização das propriedades físicas e mecânicas.

O corte dos corpos de prova foi realizado numa serra circular apropriada.

De cada amostra foi retirado os seguintes corpos de prova:

- flexão estática : 2 corpos de 65x290 mm
- massa específica aparente e umidade : 1 corpo de 100x100 mm

- absorção de água após imersão por 24 horas: 1 corpo de 100x100 mm
- inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas: 1 corpo de 100x100 mm
- ligação interna : 2 corpos de 50x50 mm

Parte dos corpos de prova da flexão estática foram reutilizados para o teste de arrancamento de parafusos.

Os corpos de prova foram condicionados adequadamente a uma atmosfera com 65% de umidade relativa e uma temperatura de 20°C.

Sendo que as condições de todos os testes e condicionamento seguiram a norma ASTM D1037-96.

### 3.2.5 Etapas do trabalho

O trabalho foi dividido em duas fases, na **Fase 1**, o enresinamento foi realizado num latão onde as partículas eram continuamente tombadas durante a pulverização da resina, na **Fase 2** o enresinamento foi realizado no pós-misturador.

Cada fase foi dividida em duas etapas, na primeira etapa foi realizada uma mistura das partículas variando o tamanho das mesmas.

Para isso, o resíduo particulado de madeira foi dividido por peneiramento em duas frações. As partículas denominadas de partículas grossas (PG), que ficaram retidas na peneira com malha de 2,35mm. As partículas denominadas de partículas finas (PF), que passaram na peneira com malha de 2,35mm e ficaram retidas na peneira com malha de 1,20 mm.

As partículas grossas foram misturadas as partículas finas nas seguintes proporções: 100%+0%; 80%+20%; 60%+40%; 40%+60%; 20%+80% e 0%+100%, respectivamente.

Na segunda etapa, foram adicionadas fibras. Na primeira fase, nas chapas contendo apenas partículas grossas foram feitas adições de fibra de sisal em proporção de 5% e 10% do peso seco do material lignocelulósico cortadas em dois comprimentos: 2 e 4 cm.

Na segunda etapa da segunda fase tanto a composição com 100% de partículas grossas quanto a composição com 100% de partículas finas receberam as fibras. No caso as fibras utilizadas foram fibras de sisal, fibras de madeira, fibras de vassoura e fibras de bananeira que foram adicionadas numa proporção de 5%, 10% e 15% do peso seco do material lignocelulósico, sendo que as fibras de sisal, vassoura e bananeira foram cortadas com comprimento de 2 cm.

A mistura entre o material particulado e as fibras mostrou-se bastante complicada, pois as fibras têm a tendência natural de ser agregar. O enresinamento foi realizado após a mistura do material particulado e as fibras.

A Tabela 15 apresenta resumida a divisão das etapas do trabalho.

Tabela 15: Fases/etapas 1/2 do trabalho

<b>Fases</b>	<b>Etapas</b>	Observação
<b>1</b>	<b>1</b>	variação entre partículas grossas e partículas finas
	<b>2</b>	partículas grossas e fibras de sisal (2 e 4 cm) (5 e 10%)
		fabricação do pós-misturador utilizado no enresinamento
<b>2</b>	<b>1</b>	variação entre partículas grossas e partículas finas
	<b>2</b>	partículas grossas, partículas finas e fibras de sisal, madeira, vassoura e bananeira (5, 10 e 15%)

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização envolveu a verificação de propriedades físicas e propriedades mecânicas além de uma análise microestrutural. O resultado da FASE 1 indicou a necessidade de



se alterar a forma de enresinamento, o que levou a fabricação do misturador. Tanto na Fase 1 como na Fase 2 do trabalho, a primeira parte foi caracterizar as chapas contendo apenas resíduo de madeira, variando o tamanho das partículas.

### 3.3.1 Propriedades físicas

As propriedades físicas caracterizadas foram as seguintes: Absorção de água e inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas além da massa específica aparente e a umidade dos corpos de prova.

### 3.3.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas caracterizadas foram as seguintes: Tensão de Ruptura na Flexão Estática, Módulo de Elasticidade na Flexão Estática, Tração Perpendicular ao Plano da Chapa (Ligação Interna) e Arrancamento de Parafuso na Face.

Existe vasta normalização internacional sobre MDF e chapas de partículas, no Brasil a ABNT edita a norma para chapa dura de fibras de madeira, NBR 10024. Na América do Norte temos a norma da ANSI A208.1 (1993), além da norma da American Society for Testing and Materials, ASTM D1037 (1996).

Na Europa a iniciativa de normalização sobre MDF, partiu de uma associação de fabricantes, a European Association of Medium Density Fibreboard Manufacturers (EMB) em 1986, hoje o European Standardization Committee (CEN) tem uma norma sobre painéis à base de madeira a EN 316.

A Tabela 16 indica as propriedades mínimas para chapas de partículas de acordo com a norma ANSI A208.1-1993.

Tabela 16: Propriedades requeridas para chapa de partículas, ANSI A208.1-1993 (FPL, 1999)

Densidade-classe	MOR (MPa)	MOE (MPa)	LI (MPa)	Dureza (N)	Arranque - parafuso (N)	
					face	canto
Alta – 1	16,5	2.400	0,90	2.225	1.800	1.325
Alta – 2	20,5	2.400	0,90	4.450	1.900	1.550
Alta – 3	23,5	2.750	1,00	6.675	2.000	1.550
Média – 1	11,0	1.725	0,40	2.225	-	-
Média – 2	14,5	2.225	0,45	2.225	1.000	900
Média – 3	16,5	2.750	0,55	2.225	1.100	1.000
Baixa – 1	3,0	550	0,10	-	400	
Baixa – 2	5,0	1.025	0,15	-	550	

Alta = densidade > 800 kg/m<sup>3</sup>, uso em pisos ou miolo de piso.  
Média = densidade de 640 a 800 kg/m<sup>3</sup>, uso em móveis e similares.  
Baixa = densidade < 640 kg/m<sup>3</sup>, uso em miolo de portas maciças.

- Módulo de ruptura (MOR)

Obtido através do ensaio de flexão estática a 3 pontos.

Segundo a ASTM D 1037 (1996), os corpos de prova devem ser retirados, metade ao longo do comprimento da chapa, e metade ao longo da largura da chapa, com o objetivo de verificar o comportamento direcional das propriedades. O corpo de prova e o ensaio seguem as seguintes condições:

- largura: 7,5cm para espessura maior que 6mm e 5cm para espessuras iguais e inferiores a 6mm.
- espessura: espessura da chapa.
- comprimento: 24 vezes a espessura mais 5cm, exemplificando, para espessura de 10mm, teremos um comprimento de 29cm.
- as medidas do corpo de prova devem ser verificadas com uma precisão de  $\pm 3\%$ .
- a distância entre os apoios fixos é de 24 vezes a espessura.

- os apoios devem ser arredondados, com o raio de pelo menos 1,5 vezes a espessura do material.
- a largura mínima dos apoios deve ser 7,5 cm.
- a aplicação da carga deve ser contínua, com uma taxa uniforme de aplicação da carga que fica limitada pela taxa de deformação na fibra mais externa, que deve ser 0,005 cm/cm/min, calculada pela seguinte equação:

$$N = \frac{zL^2}{6d} \quad (11)$$

Onde :

N = velocidade de aplicação da carga (cm/min), z = taxa de deformação da fibra mais externa (0,005 cm/cm/min), L = distância entre apoios (cm),

- d = espessura do corpo de prova (cm).
- as leituras das deflexões e respectivas cargas, devem ser feitas no mínimo a cada 0,1 mm, deve ser anotada na primeira falha a deflexão e máxima carga.
- deve ser relatada a condição da ruptura, em relação a falha inicial, se foi de compressão ou de tração.
- após o teste deve ser determinado o conteúdo de umidade dos corpos de prova, cortando-se um pedaço (25mm), pesando-se, após secar em estufa a  $103 \pm 2^\circ$  C, determinar o peso seco (peso constante). A relação entre a quantidade de água e o peso seco expressa o conteúdo de umidade em porcentagem.
- pode-se ser calculado: MOR = módulo de ruptura, E = módulo de elasticidade

aparente, através das seguintes equações.

$$MOR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (12)$$

$$E = \frac{P_1L^3}{4bd^3y_1} \quad (13)$$

Onde :

P = carga máxima, (N);

L = comprimento do vão (m);

b = largura do corpo de prova (m);

d = espessura do corpo de prova (m);

P<sub>1</sub> = carga no limite de proporcionalidade (N), retirada da curva Carga-Deflexão;

y<sub>1</sub> = deformação no limite de proporcionalidade (m), retirada da curva Carga-Deflexão.

Nos testes de flexão estática de chapas de partículas, é notado que o modo de ruptura normal e por falha na face que sofre tração (HOYLE, 1973).

- Ligação interna

A ligação interna ou tração perpendicular é a resistência que um corpo oferece quando submetido a forças de tração aplicadas perpendicularmente à superfície da chapa.

A ligação interna da chapa é avaliada onde a resistência a tração perpendicular ao plano da chapa é assumida ser menor, na camada central do painel (miolo).

O teste de tração perpendicular é usada para determinar a coesão na direção perpendicular ao plano da chapa.

A dimensão do corpo de prova é de 50x50mm, com a espessura da chapa. Os blocos de carregamento de aço ou de alumínio serão unidos no corpo de prova através de um adesivo adequado. O adesivo recomendado são resinas Epoxy. A pressão necessária para unir os blocos não deve danificar o corpo de prova.

A direção de carregamento deve ser tanto quanto possível perpendicular as faces do corpo de prova, e o centro da carga deve passar pelo centro do corpo de prova.

Aplica-se a carga continuamente durante o teste a uma velocidade 0,8 mm/mm da espessura por minuto. No caso de chapas com espessura de 10 mm, a velocidade fica em 0,80 mm/min.

A tensão de ruptura (kPa) é obtida com a carga máxima. O relatório deve incluir a localização da linha de ruptura.

- Extração de parafuso

A resistência a extração ou arrancamento de parafuso pode ser feita na superfície ou no topo, através de um ensaio de tração sobre um parafuso fixado na placa.

Pela ASTM D 1037-1996, o corpo de prova e o ensaio devem seguir as seguintes recomendações:

- largura: no mínimo 7,5 cm;
- comprimento: no mínimo de 15 cm;
- parafusos: 2,80mm de diâmetro, colocados retos na face, numa profundidade de 12mm;
- o ensaio pode ser feito com os corpos de prova secos ou após a imersão;
- a velocidade de retirada do parafuso deve ser uniforme, igual a 1,5 mm/min.
- a máxima carga deve ser medida.

- Inchamento

A variação da espessura ou inchamento é verificada após a imersão de um corpo de prova em água sob determinadas condições pelo período variado (na tabela é 24 horas), após é determinada o inchamento, assim como a quantidade de água absorvida.

A ASTM D 1037 (1996), determina a temperatura da água em  $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ , o corpo de prova após a imersão por 24 horas, deve ser pesado, e a quantidade de água determinada pela diferença do peso original do corpo de prova. De mesma maneira a variação de espessura é determinada antes e após o teste de imersão, calculando-se o inchamento como a percentagem da variação da dimensão pela dimensão inicial.

### 3.3.3 Microestrutura

A microestrutura foi avaliada com a ajuda da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além da utilização de um modelo teórico para confirmar algumas características microestruturais detectadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados divididos nas fases e etapas. Além dos resultados das propriedades físicas e mecânicas é apresentada também a caracterização da estrutura da chapa. Os resultados foram avaliados estatisticamente através de análise de variância e teste de Tukey com um nível de probabilidade de 95%.

A umidade dos corpos de prova foi em média de 7,5% após o condicionamento e a densidade aparente registrada em torno de  $0,75 \text{ g/cm}^3$ , estatisticamente sem variações para todos os corpos de prova.

### 4.1 FASE 1 - ETAPA 1

As propriedades físicas caracterizadas foram as seguintes: absorção de água e inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas além da densidade aparente e a umidade dos corpos de prova.

Além disso, como propriedades mecânicas foram caracterizadas: tensão de ruptura na flexão estática, módulo de elasticidade, força de arrancamento de parafuso, e tensão de ruptura na tração perpendicular (ligação interna).

A verificação da estrutura das chapas foi realizada com a ajuda da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

#### 4.1.1 Tensão de ruptura na flexão estática

A Tabela 17 fornece a tensão de ruptura para as diversas composições utilizadas, os valores apresentados são a média aritmética obtida dos testes. A variação dos valores pode ser melhor acompanhada pela Figura 18.

Tabela 17: FASE 1 - Etapa 1 - Tensão de ruptura (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	7,67	1,86	24,3
80% PG+20% PF	7,57	1,56	20,6
60% PG+40% PF	7,16	1,42	19,8
40% PG+60% PF	7,41	0,92	12,4
20% PG+80% PF	7,99	1,59	19,9
100% Partículas finas (PF)	10,57	1,95	18,4

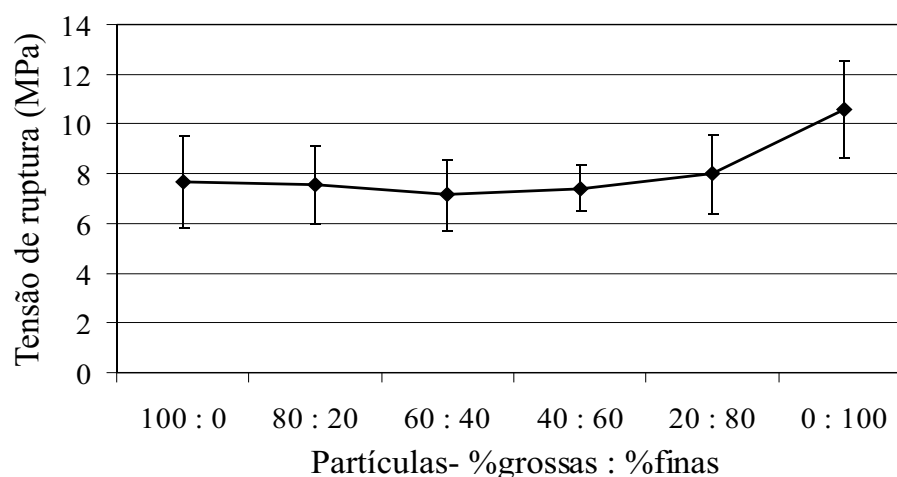


Figura 18: FASE 1 - Etapa 1 - Tensão de ruptura

Todos os resultados são inferiores aos requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma tensão de ruptura de 11 MPa para chapas de média densidade, classe 1.

Os valores apresentados para a composição com 100% de partículas finas estão de acordo com os resultados apresentados por BRITO (1995) que processou chapas aglomeradas à partir de maravalhas.

O processo de mistura das partículas com diferentes tamanhos mostrou-se pouco eficiente, mesmo para a chapa com 80% de partículas finas o resultado da tensão de rup-



tura (7,99 MPa) ficou 25% abaixo daquele encontrado para 100% de partículas finas (10,57 MPa).

A variação da tensão de ruptura entre as composições está em desacordo com aquilo indicado por TALBOT e MALONEY (1957), citados por KELLY (1997), que indicam valores relativos superiores para partículas grossas (grandes).

Estatisticamente somente a chapa com 100% de partículas finas tem um valor diferenciado de tensão de ruptura.

#### 4.1.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 18, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 19.

Tabela 18: FASE 1 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	1968	613	31,1
80% PG+20% PF	1964	374	19,0
60% PG+40% PF	1922	427	22,2
40% PG+60% PF	2000	602	30,1
20% PG+80% PF	1905	563	29,6
100% Partículas finas (PF)	1868	648	34,7

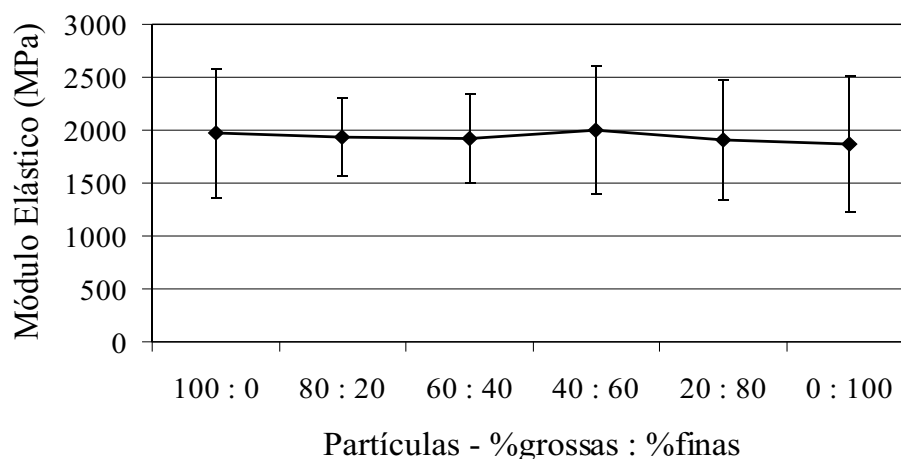


Figura 19: FASE 1 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade

Todos os resultados são superiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica um módulo de elasticidade de 1.725 MPa para chapas de média densidade, classe 1 e inferiores ao indicado para a classe 2 (2.225 MPa).

Estatisticamente nenhuma composição tem valor diferenciado de módulo de elasticidade.

#### 4.1.3 Arrancamento de parafuso na face

A força de arrancamento de parafuso na face das chapas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 19, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 20.

Tabela 19: FASE 1 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso (N)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	760	80	10,5
80% PG+20% PF	832	76	9,1
60% PG+40% PF	920	115	12,5
40% PG+60% PF	871	150	17,2
20% PG+80% PF	915	138	15,1
100% Partículas finas (PF)	893	130	14,6

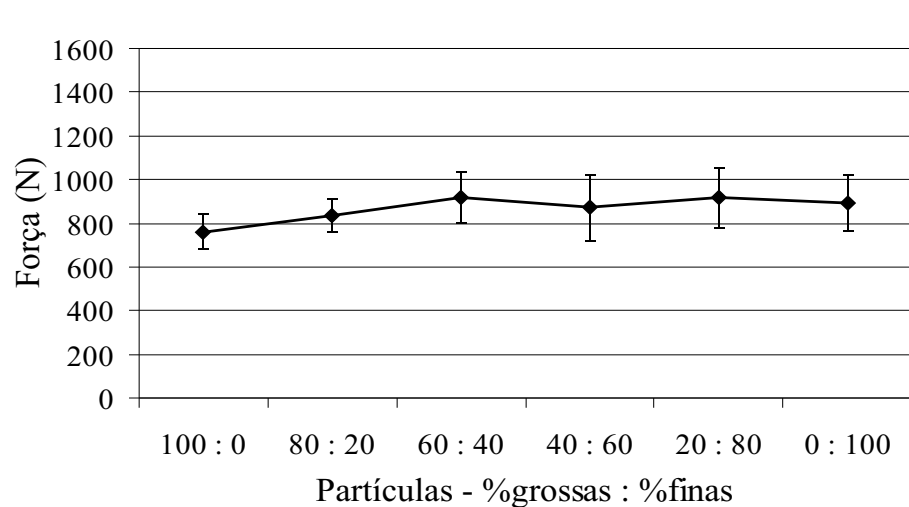


Figura 20: FASE 1 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso

Todos os resultados são inferiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica um força para arranque de parafuso na face de 1.000 N para chapas de média densidade, classe 2.

Estatisticamente nenhuma composição tem valor diferenciado de força de arrancamento de parafuso.

#### 4.1.4 Tração perpendicular (Ligação interna)

A tensão na tração perpendicular (ligação interna) para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 20, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 21.

Tabela 20: FASE 1 - Etapa 1 - Ligação interna (kPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	132	46	34,8
80% PG+20% PF	127	56	44,1
60% PG+40% PF	147	54	36,7
40% PG+60% PF	186	61	32,8
20% PG+80% PF	214	46	21,5
100% Partículas finas (PF)	232	72	31,0

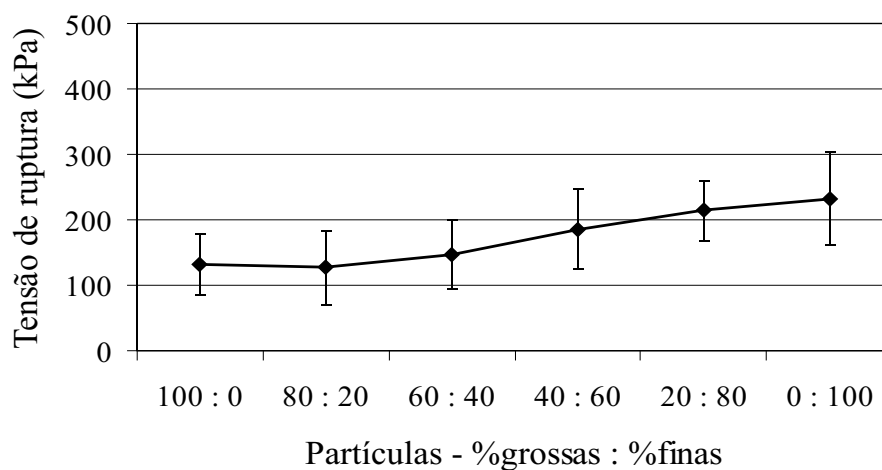


Figura 21: FASE 1 - Etapa 1 - Ligação Interna

Todos os resultados são inferiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma ligação interna de 400 kPa para chapas de média densidade, classe 1.

Estatisticamente existe uma diferença nos valores de ligação interna quando comparamos as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.

#### 4.1.5 Absorção de água

A absorção de água após imersão por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 21, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 22.

Tabela 21: FASE 1 - Etapa 1 - Absorção de água (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	110,9	13,8	12,4
80% PG+20% PF	97,6	8,9	9,1
60% PG+40% PF	106,1	4,3	4,1
40% PG+60% PF	107,4	11,8	11,0
20% PG+80% PF	98,3	13,9	14,1
100% Partículas finas (PF)	91,1	16,6	18,2

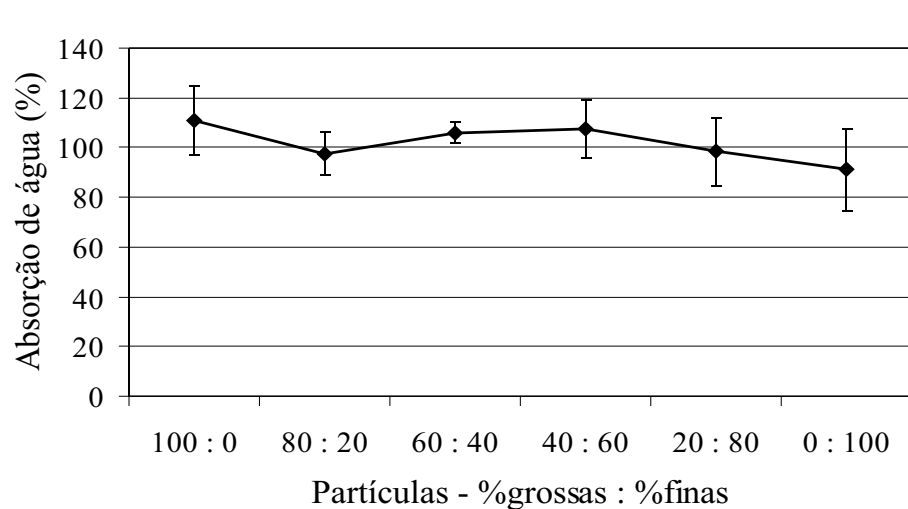


Figura 22: FASE 1 - Etapa 1 - Absorção de água

Os valores apresentados para absorção de água estão um pouco acima daqueles resul-

tados apresentados por BRITO (1995) que usou parafina como aditivo para diminuir a absorção de água.

Estatisticamente nenhuma composição tem valor diferenciado de absorção de água.

#### 4.1.6 Inchamento em espessura

O inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 22, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 23.

Tabela 22: FASE 1 - Etapa 1 - Inchamento em espessura (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	48,5	7,9	13,6
80% PG+20% PF	50,1	7,8	15,6
60% PG+40% PF	41,2	12,9	31,3
40% PG+60% PF	43,5	5,7	13,1
20% PG+80% PF	40,0	9,1	22,8
100% Partículas finas (PF)	26,0	9,5	35,5

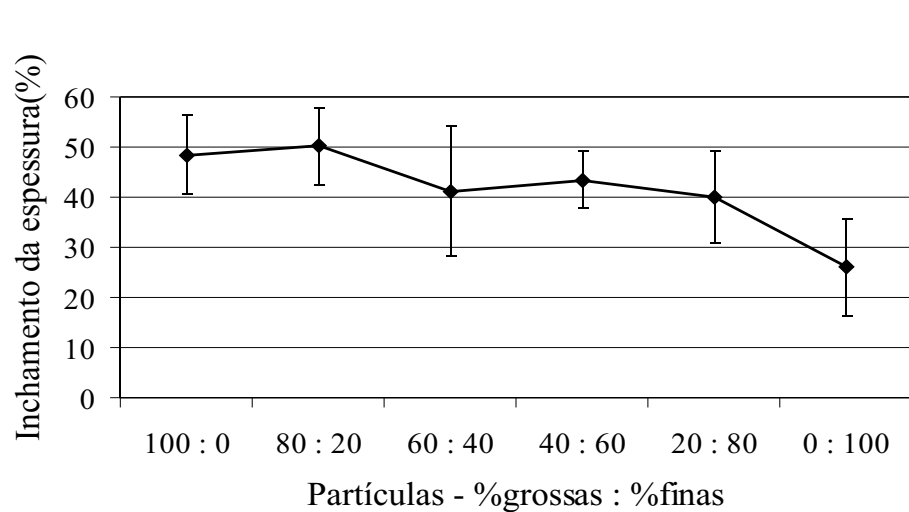


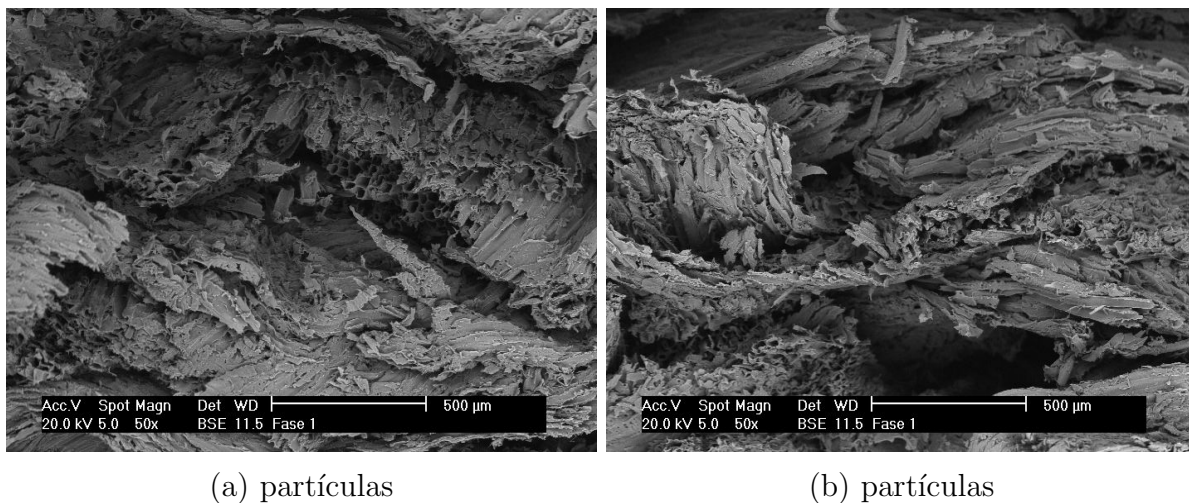
Figura 23: FASE 1 - Etapa 1 - Inchamento em Espessura

Os valores apresentados de inchamento em espessura para a composição com 100% de partículas finas estão de acordo com os resultados apresentados por BRITO (1995).

Estatisticamente existe diferença entre os valores de inchamento em espessura para a chapa com 100% de partículas finas e a chapa com 100% de partículas grossas.

#### 4.1.7 Microestrutura

A microestrutura das chapas aglomeradas processadas na fase 1, foram caracterizadas com a ajuda de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 24 apresenta fotomicrografias MEV da superfície fraturadas das chapas aglomeradas feitas com as partículas grossas. Chama atenção nas Figuras 24(a) e 24(b) muitos vazios devido possivelmente à adesão inadequada responsável pelos baixos valores de ligação interna (132 kPa)(Tabela 20). Também nota-se que o formato das partículas mantém a forma côncava inicial. A Figura 24(c) apresenta o aspecto celular das partículas.



(a) partículas

(b) partículas



(c) estrutura celular

Figura 24: Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 1 feitas com partículas grossas

## 4.2 FASE 1 - ETAPA 2

Os resultados da segunda etapa (primeira fase) são aqueles referentes à inclusão de fibras de sisal (5 e 10% com comprimento de 2 e 4 cm) como reforço.

### 4.2.1 Tensão máxima na flexão estática

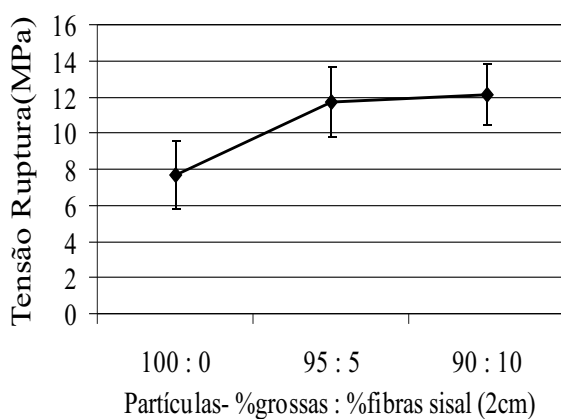
A Tabela 23 fornece a tensão de ruptura para as diversas composições utilizadas, os valores apresentados são a média aritmética obtida dos testes. A variação dos valores



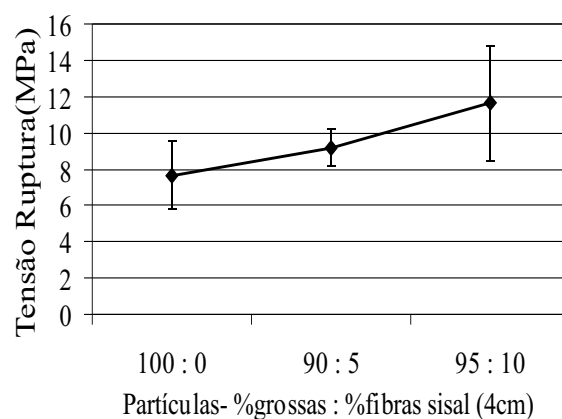
pode ser mais bem acompanhada pela Figura 25.

Tabela 23: FASE 1 - Etapa 2 - Tensão de ruptura (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
Partículas grossas	7,67	1,86	24,3
95 % PG + 5% sisal (2 cm)	11,72	1,93	16,5
90 % PG + 10% sisal (2 cm)	12,15	1,69	13,9
95 % PG + 5% sisal (4 cm)	9,19	1,02	11,1
90 % PG + 10% sisal (4 cm)	11,62	3,16	27,2



(a) Reforço com fibras de sisal (2 cm)



(b) Reforço com fibras de sisal (4 cm)

Figura 25: FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Tensão de ruptura

O acréscimo nos valores da tensão de ruptura na flexão com apenas 5% de fibras de sisal foi marcante, principalmente para a fibra de 2 cm de comprimento, passando de 7,67 MPa para 11,72 MPa, perfazendo um aumento relativo de 52%.

Nota-se que o aumento na tensão de ruptura não foi proporcional ao aumento da quantidade de fibras de sisal. Fato este, provavelmente devido à aglomeração das fibras, que aumentava com o aumento na quantidade adicionada.

Pelo mesmo fato, a aglomeração das fibras, provavelmente os resultados encontrados na adição das fibras com 4 cm, foram inferiores aqueles encontrados para as fibras com 2 cm. Quanto maior a fibra, maior foi à aglomeração das fibras durante o processo de

enresinamento.

O resultado obtido com o acréscimo de 5% de fibras de sisal com 2 cm de comprimento é superior ao requerido para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma tensão de ruptura de 11 MPa para chapas de média densidade, classe 1.

O melhor resultado para a tensão de ruptura na flexão estática foi 12,15 MPa com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento.

Estatisticamente existe diferença no valor da tensão de ruptura com o acréscimo de 5% e 10% de fibras de sisal (2 cm) e com o acréscimo de 10% de fibras de sisal (4 cm) em relação a chapa de controle.

#### 4.2.2 Módulo de elasticidade na flexão estática

O Módulo de Elasticidade para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 24, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 26.

Tabela 24: FASE 1 - Etapa 2 - Módulo de elasticidade (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
Partículas grossas	1968	613	31,1
95 % PG + 5% sisal (2 cm)	3099	189	6,1
90 % PG + 10% sisal (2 cm)	3245	232	7,1
95 % PG + 5% sisal (4 cm)	2443	415	17,0
90 % PG + 10% sisal (4 cm)	2921	197	6,7

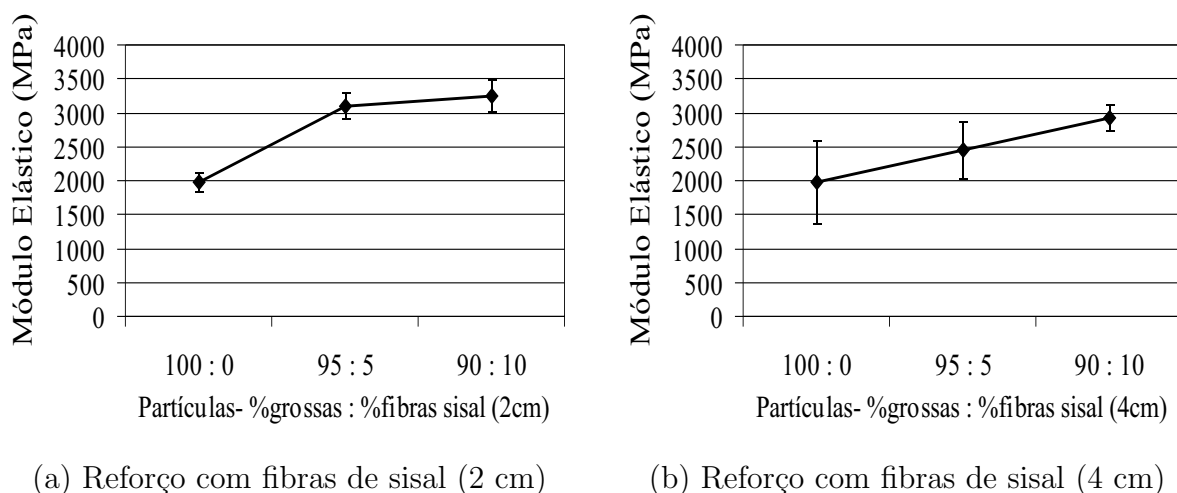


Figura 26: FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Módulo de elasticidade

O acréscimo nos valores do módulo de elasticidade com o reforço das fibras de sisal foram marcantes, principalmente com a fibra de 2 cm de comprimento.

A variação do Módulo de elasticidade foi também influenciada pela aglomeração das fibras durante o processo de enresinamento, que aumentou com o aumento da quantidade e com o aumento no comprimento das fibras adicionadas.

O melhor resultado para o módulo de elasticidade foi 3245 MPa com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento.

Estatisticamente existe diferença no valor do módulo de elasticidade com o acréscimo de 5% e 10% de fibras de sisal (2 cm) e com o acréscimo de 10% de fibras de sisal (4 cm) em relação a chapa de controle.

#### 4.2.3 Arrancamento de parafuso na face

A força de arrancamento de parafuso na face das chapas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 25, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada

pela Figura 27.

Tabela 25: FASE 1 - Etapa 2 - Força de arrancamento de parafuso (N)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
Partículas grossas	760	80	10,5
95 % PG + 5% sisal (2 cm)	1159	119	10,3
90 % PG + 10% sisal (2 cm)	1230	133	10,8
95 % PG + 5% sisal (4 cm)	1079	233	21,6
90 % PG + 10% sisal (4 cm)	1035	46	4,4

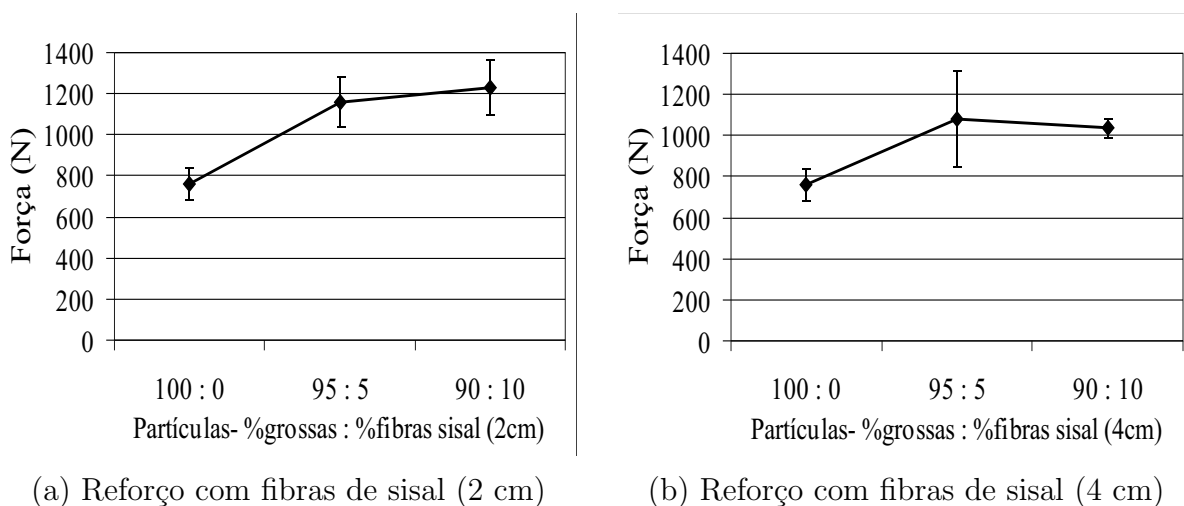


Figura 27: FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Força de arrancamento de parafuso

Pode-se notar o excelente desempenho da adição de apenas 5% de fibras de sisal. Que no caso das fibras com comprimento de 2 cm, aumentou a força de arrancamento de 760 para 1159 N, um acréscimo relativo de 52,5%.

O aumento na força de arrancamento de parafuso não foi proporcional ao aumento da quantidade de fibras quando comparamos a adição de 5% e 10%, possivelmente devido à aglomeração das fibras durante a mistura das partículas.

O melhor resultado para a força de arrancamento de parafuso foi 1230 N com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento.

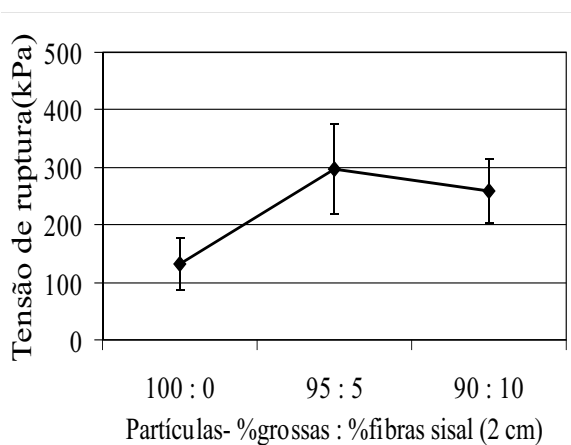
Estatisticamente existe diferença no valor da força de arrancamento de parafuso na face com o acréscimo de 5% e 10% de fibras de sisal (2 cm) em relação a chapa de controle.

#### 4.2.4 Tração perpendicular (Ligação interna)

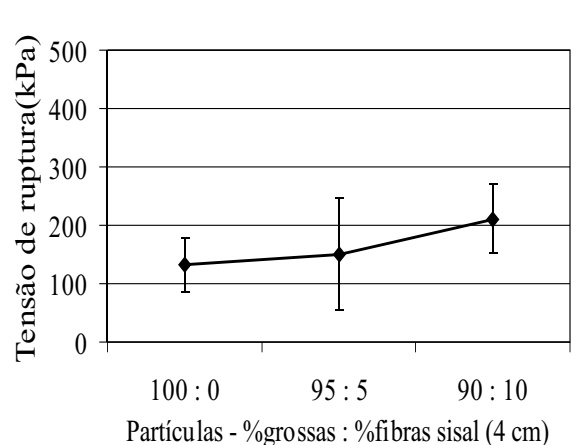
A Tensão na Tração Perpendicular (Ligação Interna) para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 26, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 28.

Tabela 26: FASE 1 - Etapa 2 - Ligação interna (kPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
Partículas grossas	132	46	34,8
95 % PG + 5% sisal (2 cm)	298	78	26,2
90 % PG + 10% sisal (2 cm)	259	56	21,6
95 % PG + 5% sisal (4 cm)	151	96	63,6
90 % PG + 10% sisal (4 cm)	211	59	28,0



(a) Reforço com fibras de sisal (2 cm)



(b) Reforço com fibras de sisal (4 cm)

Figura 28: FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Ligação interna

Houve um acréscimo relativo nos valores para Ligação interna com a adição das fibras de sisal tanto para fibras com 2 cm tanto quanto para 4 cm. Apesar disso os resulta-

dos são inferiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma ligação interna de 400 kPa para chapas de média densidade, classe 1.

O melhor resultado para a ligação interna foi 298 kPa com acréscimo de 5% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento, evidenciando uma interferência das fibras na resistência do compósito para tensões aplicadas na direção perpendicular da chapa.

Estatisticamente existe diferença no valor da ligação interna com o acréscimo de 5% e 10% de fibras de sisal (2 cm) em relação a chapa de controle.

#### 4.2.5 Absorção de água

A absorção de água após imersão por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 27, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 29.

Tabela 27: FASE 1 - Etapa 2 - Absorção de água (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
Partículas grossas	110,9	13,8	12,4
95 % PG + 5% sisal (2 cm)	84,1	9,4	11,1
90 % PG + 10% sisal (2 cm)	76,2	3,6	4,7
95 % PG + 5% sisal (4 cm)	93,1	5,9	6,3
90 % PG + 10% sisal (4 cm)	84,3	1,2	1,4

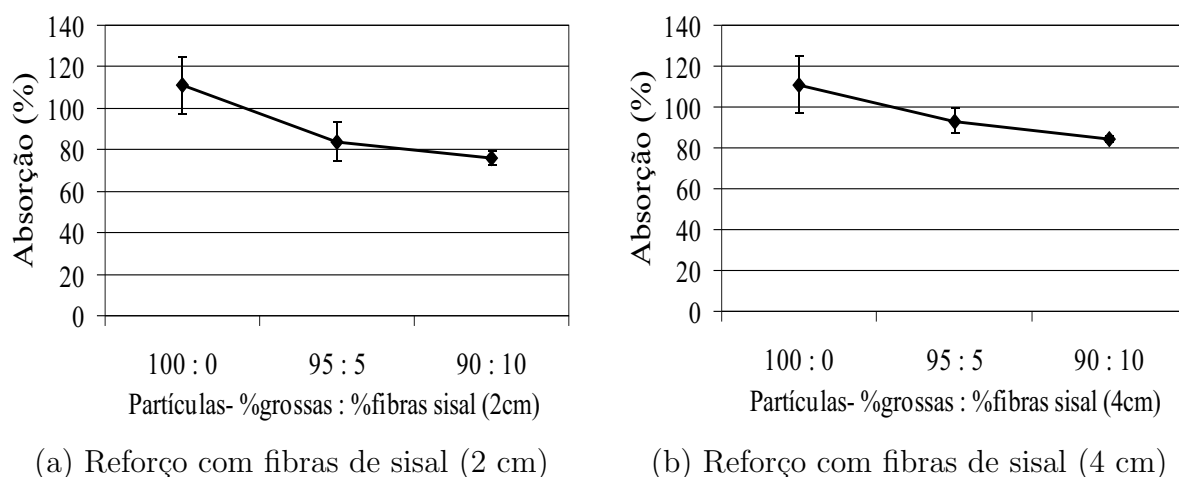


Figura 29: FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Absorção de água

Houve um decréscimo relativo nos valores para absorção de água com a adição das fibras de sisal tanto para fibras com 2 cm tanto quanto para 4 cm. O melhor resultado para a absorção de água foi 76% com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento.

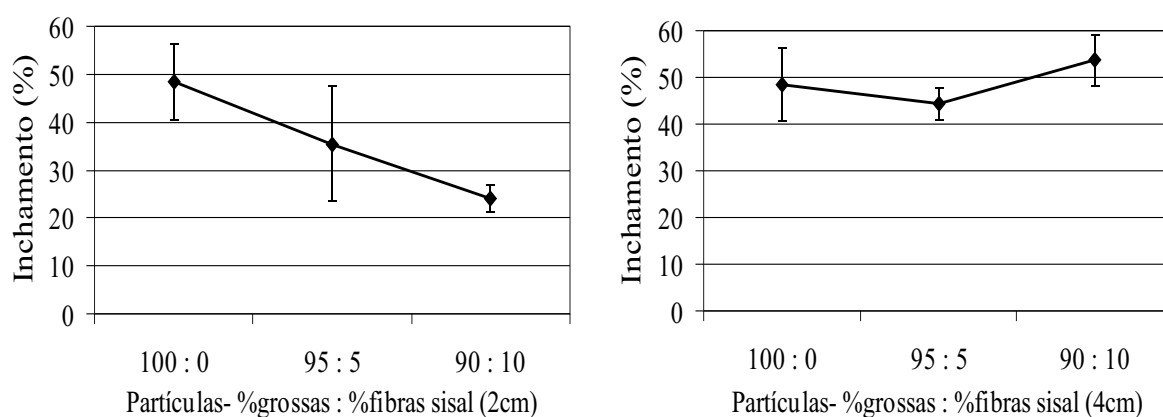
Estatisticamente existe diferença no valor da absorção de água com o acréscimo de 5% e 10% de fibras de sisal (2 cm) e com o acréscimo de 10% de fibras de sisal (4 cm) em relação a chapa de controle.

#### 4.2.6 Inchamento em espessura

O Inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 28, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 30.

Tabela 28: FASE 1 - Etapa 2 - Inchamento em espessura (%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
Partículas grossas	48,5	7,9	16,3
95 % PG + 5% sisal (2 cm)	35,4	12,1	34,2
90 % PG + 10% sisal (2 cm)	24,1	2,6	10,8
95 % PG + 5% sisal (4 cm)	44,5	3,4	7,6
90 % PG + 10% sisal (4 cm)	53,7	5,4	10,1



(a) Reforço com fibras de sisal (2 cm)

(b) Reforço com fibras de sisal (4 cm)

Figura 30: FASE 1 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras de sisal - Inchamento em espessura

Houve um decréscimo relativo nos valores para inchamento em espessura com a adição das fibras de sisal principalmente para fibras com 2 cm de comprimento.

O melhor resultado para o inchamento em espessura foi 24% com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento.

Estatisticamente somente existe diferença no valor do inchamento em espessura com o acréscimo de 10% de fibras de sisal (2 cm) em relação a chapa de controle.



#### 4.2.7 Síntese dos resultados

A síntese dos resultados pode ser observada na Tabela 29. O resultado máximo para cada propriedade está destacado.

Verifica-se que os melhores resultados foram todos obtidos com a adição de fibras de sisal com 2 cm de comprimento, evidenciando a má distribuição das fibras com 4 cm de comprimento devido à aglomeração.

A melhora relativa dos resultados com acréscimo de 5% de fibras (de 0 para 5%), foi maior que o conseguido com o acréscimo de 5 para 10% em todas as propriedades.

Tabela 29: Resumo geral dos resultados da FASE 1

PROPRIEDADE	100% Part.	Reforço com fibras			
		Sisal (2 cm)		Sisal (4 cm)	
		5%	10%	5%	10%
Tensão de ruptura na flexão estática (MPa)	7,67	11,72	<b>12,15</b>	9,19	11,62
Módulo de elasticidade na flexão estática (GPa)	1968	3099	<b>3245</b>	2443	2921
Força de arrancamento de parafuso (N)	760	1159	<b>1230</b>	1079	1035
Ligação interna (kPa)	132	<b>298</b>	259	151	211
Absorção de água (%)	110	84	<b>76</b>	93	84
Inchamento em espessura (%)	48	35	<b>24</b>	44	54

#### 4.3 FASE 2 - ETAPA 1

O critério de caracterização utilizado na primeira fase foi repetido na segunda fase.

### 4.3.1 Tensão de ruptura na flexão estática

A Tabela 30 fornece a tensão de ruptura para as diversas composições utilizadas, os valores apresentados são a média aritmética obtida dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 31.

Tabela 30: FASE 2 - Etapa 1 - Tensão de ruptura (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	13,41	2,27	16,9
80% PG+20% PF	13,19	2,65	20,1
60% PG+40% PF	13,07	2,56	19,6
40% PG+60% PF	12,94	2,38	18,4
20% PG+80% PF	12,81	1,86	14,5
100% Partículas finas (PF)	11,08	1,40	12,6

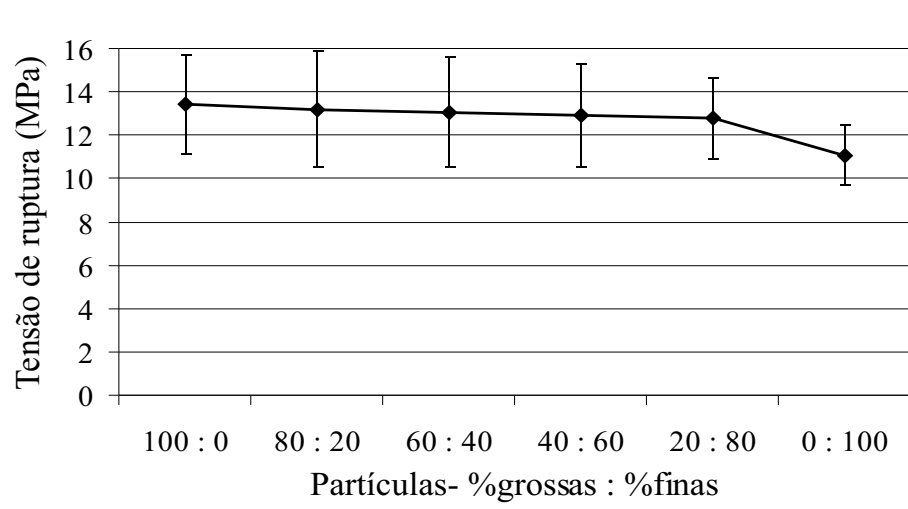


Figura 31: FASE 2 - Etapa 1 - Tensão de ruptura

Os resultados da segunda fase mostram uma tendência totalmente diferente daqueles obtidos na primeira fase, visto que os valores para a tensão de ruptura na flexão foram superiores para a composição com 100% de partículas grossas, evidenciando que a alteração no tamanho e principalmente na forma das partículas durante o processo de pós-mistura resultou num melhora da adesão das partículas.

Os valores da tensão de ruptura na flexão superiores para as partículas grossas estão de acordo com os resultados de TALBOT E MALONEY (1957) citados por KELLY (1997).

Ao contrário da primeira fase, todos os resultados são superiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma tensão de ruptura de 11 MPa para chapas de média densidade, classe 1.

Nota-se que o enresinamento feito no misturador mecânico teve grande efeito sobre as partículas grossas, aumentando a tensão de ruptura 75% (de 7,67 para 13,41 MPa), já o aumento relativo para as partículas finas foi de apenas 5% (de 10,57 para 11,08 MPa).

Estatisticamente não existe diferença no valor da tensão de ruptura entre as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.

#### 4.3.2 Módulo de elasticidade na flexão estática

O módulo de Elasticidade para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 31, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 32.

Tabela 31: FASE 2 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	2192	329	15,1
80% PG+20% PF	2164	395	18,3
60% PG+40% PF	2134	450	21,1
40% PG+60% PF	2168	686	31,6
20% PG+80% PF	2148	400	18,6
100% Partículas finas (PF)	1957	161	8,2

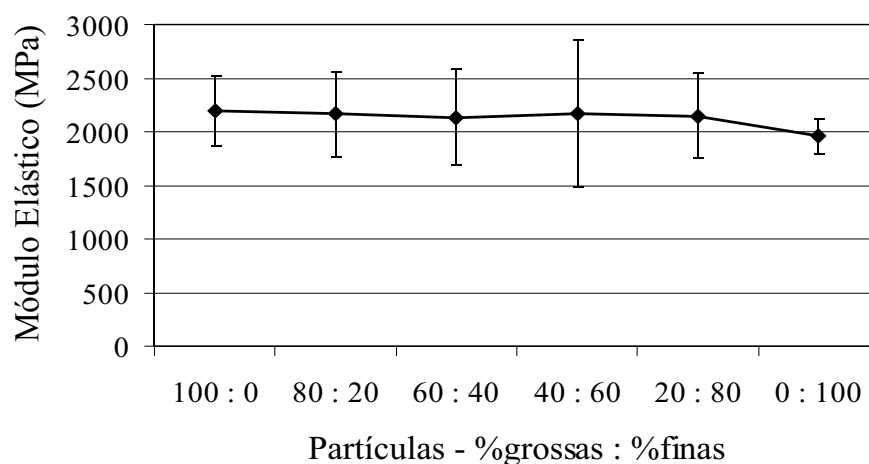


Figura 32: FASE 2 - Etapa 1 - Módulo de elasticidade

A tendência dos resultados do módulo de elasticidade da segunda fase comparados com a primeira fase segue o resultado encontrado para os valores de tensão de ruptura, ou seja, na segunda fase os valores superiores foram àqueles obtidos com a chapa com 100% de partículas grossas, diferente da primeira fase.

Não houve um aumento no módulo de elasticidade tão marcante entre os dados da primeira e segunda fase tanto quanto para a tensão de ruptura. Para as partículas grossas o aumento foi de 11% (de 1968 para 2192 MPa).

Estatisticamente não existe diferença no valor do módulo de elasticidade entre as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.

#### 4.3.3 Arrancamento de parafuso na fase

A força de arrancamento de parafuso na face das chapas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 32, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 33.

Tabela 32: FASE 2 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso (N)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	1416	151	10,7
80% PG+20% PF	1161	458	39,4
60% PG+40% PF	1128	210	18,6
40% PG+60% PF	1255	397	31,6
20% PG+80% PF	1247	120	9,6
100% Partículas finas (PF)	898	115	12,8

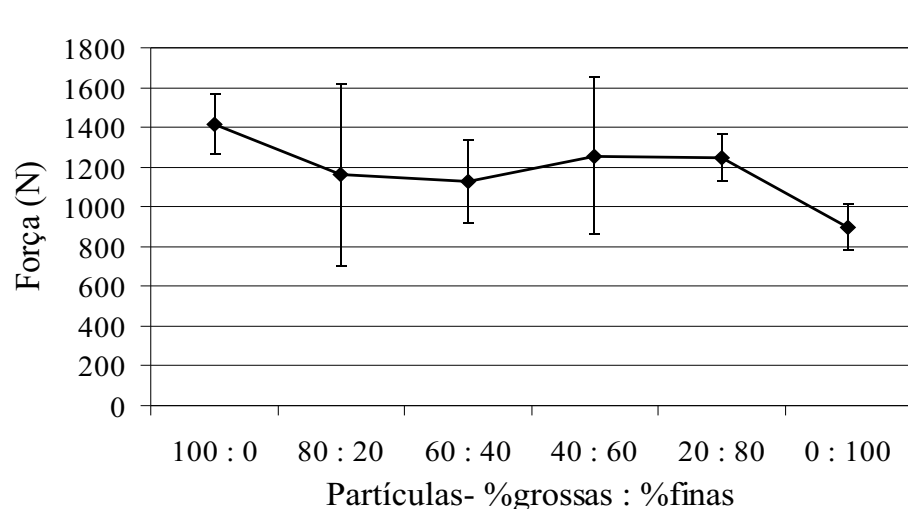


Figura 33: FASE 2 - Etapa 1 - Força de arrancamento de parafuso

Comparando-se os dados da força de arrancamento de parafuso na face da segunda fase com os da primeira fase, podemos notar um aumento expressivo e uma alteração na tendência entre as partículas grossas e partículas finas.

Para as partículas grossas o aumento foi de 86% (760 para 1416 N) quando comparamos os dados da primeira e segunda fase respectivamente.

Ao contrário da primeira fase, menos o resultado para a composição com 100% de partículas finas, todos são superiores aos requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma força para arranque de parafuso na face de 1.000 e 1.100 N para chapas de média densidade, classe 2 e classe 3 respectivamente.

Estatisticamente existe diferença no valor da força de arrancamento de parafuso entre as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.

#### 4.3.4 Tração perpendicular (Ligação interna)

A tensão na tração perpendicular (Ligação interna) para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 33, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 34.

Tabela 33: FASE 2 - Etapa 1 - Ligação interna (kPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	695	138	19,9
80% PG+20% PF	534	267	50,0
60% PG+40% PF	510	82	16,1
40% PG+60% PF	578	231	40,0
20% PG+80% PF	564	97	17,2
100% Partículas finas (PF)	550	152	27,6

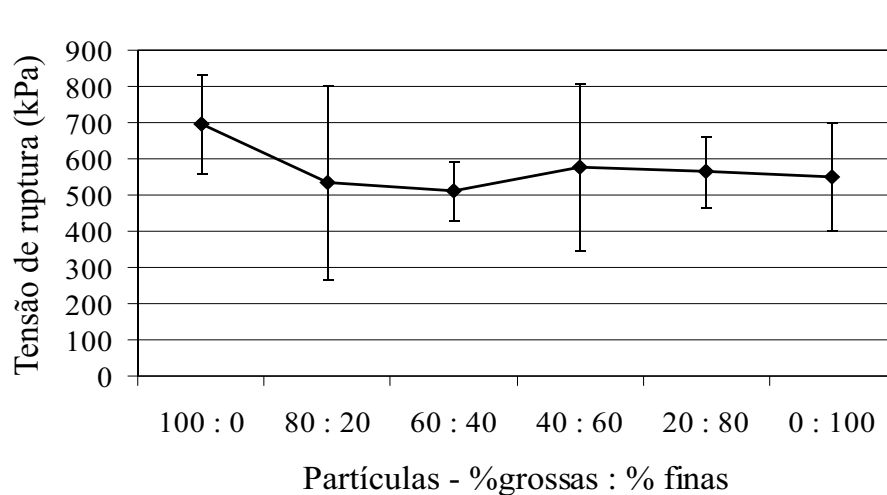


Figura 34: FASE 2 - Etapa 1 - Ligação interna

Comparando os resultados da primeira e segunda fase, notamos a tensão na tração

perpendicular à face da chapa (ligação interna) foi a propriedade mecânica que mais sofreu alteração em função da mudança no processo de enresinamento.

Como observado tanto para tensão de ruptura na flexão, módulo de elasticidade e força de arrancamento de parafuso na face, a tensão na tração perpendicular teve alterado a tendência dos valores entre as partículas grossas e partículas finas, ou seja, na segunda fase os valores para as partículas grossas foram superiores.

O valor determinado para as partículas grossas na segunda fase foi 426% (de 132 para 695 kPa) maior que o valor determinado na primeira fase. Mesmo para as partículas finas houve um aumento relativo de 137% (de 232 para 564 kPa) mostrando que o processo de enresinamento mecânico provocou sem dúvida uma melhora significativa na distribuição do adesivo nas partículas melhorando à adesão.

Ao contrário da primeira fase, todos os valores de ligação interna são superiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma tensão na tração perpendicular a face da chapa de 0,40 e 0,45 MPa para chapas de média densidade, classe 1 e classe 2 respectivamente. Sendo que os valores observados nas chapas com composição de 100% de partículas grossas e 100% de partículas finas atingem o nível exigido para as chapas de média densidade classe 3 (0,55 MPa).

Estatisticamente não existe diferença no valor da ligação interna entre as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.

#### 4.3.5 Absorção de água

A absorção de água após imersão por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 34, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela

Figura 35.

Tabela 34: FASE 2 - Etapa 1 - Absorção de água(%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	78,7	2,8	3,6
80% PG+20% PF	87,8	15,6	17,8
60% PG+40% PF	80,2	8,8	11,0
40% PG+60% PF	80,9	17,2	21,3
20% PG+80% PF	72,5	6,1	8,4
100% Partículas finas (PF)	84,9	6,2	7,3

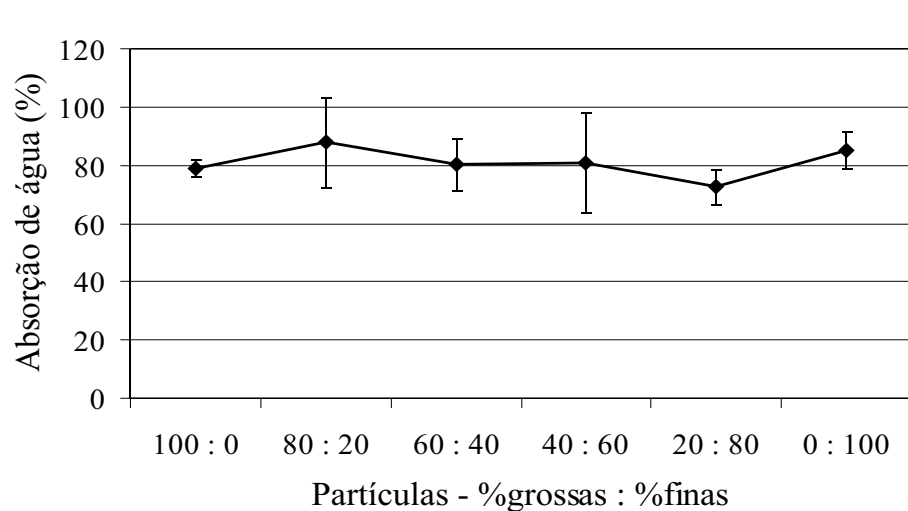


Figura 35: FASE 2 - Etapa 1 - Absorção de água

Comparando os valores da absorção de água após imersão por 24 horas obtidos na primeira e segunda fase, nota-se que um decréscimo nos valores para a composição com 100% de partículas grossas (de 110,9 para 78,7%).

Os valores apresentados de absorção para chapas com 100% de partículas grossas são melhores que os resultados apresentados por BRITO (1995).

Estatisticamente não existe diferença no valor da absorção de água entre as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.



## 4.3.6 Inchamento em espessura

O inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 35, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figura 36.

Tabela 35: FASE 2 - Etapa 1 - Inchamento em espessura(%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	média	desvio padrão	c.v.
100% Partículas grossas (PG)	22,4	2,5	11,1
80% PG+20% PF	23,5	8,5	36,2
60% PG+40% PF	20,8	2,4	11,5
40% PG+60% PF	20,2	6,2	30,7
20% PG+80% PF	21,8	1,7	7,8
100% Partículas finas (PF)	22,0	1,9	8,6

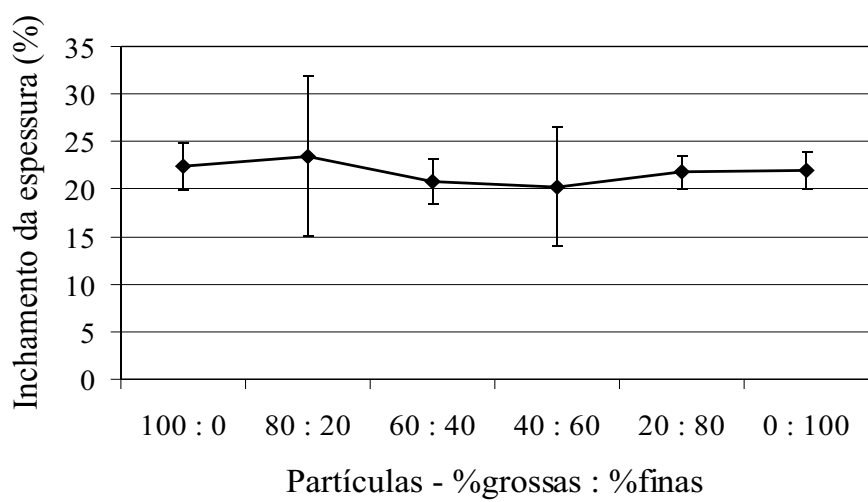


Figura 36: FASE 2 - Etapa 1 - Inchamento em Espessura

A modificação no processo de enresinamento implementado na segunda fase modificou também o inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas. Para a composição com 100% de partículas grossas o inchamento em espessura teve um decréscimo

relativo de 46% (de 48,5 para 22,4%). Os valores apresentados de inchamento em espessura para chapas com 100% de partículas grossas e 100% de partículas finas são melhores que os resultados apresentados por BRITO (1995).

Estatisticamente não existe diferença no valor do inchamento em espessura entre as chapas com 100% de partículas finas e 100% de partículas grossas.

#### 4.3.7 Microestrutura

A microestrutura das chapas aglomeradas da segunda fase apresenta-se muito mais compacta (Figura 37) quando comparadas com aquelas da primeira fase (Figura 24). De fato, comparando-se os valores de ligação interna da primeira fase (132 kPa) com os obtidos na segunda fase (695 kPa), verifica-se que a adesão entre as partículas na segunda fase foi muito maior (426%) que aquela obtida da primeira fase.

Também se nota, contrastando com a primeira fase, uma mudança na forma inicial côncava das partículas.

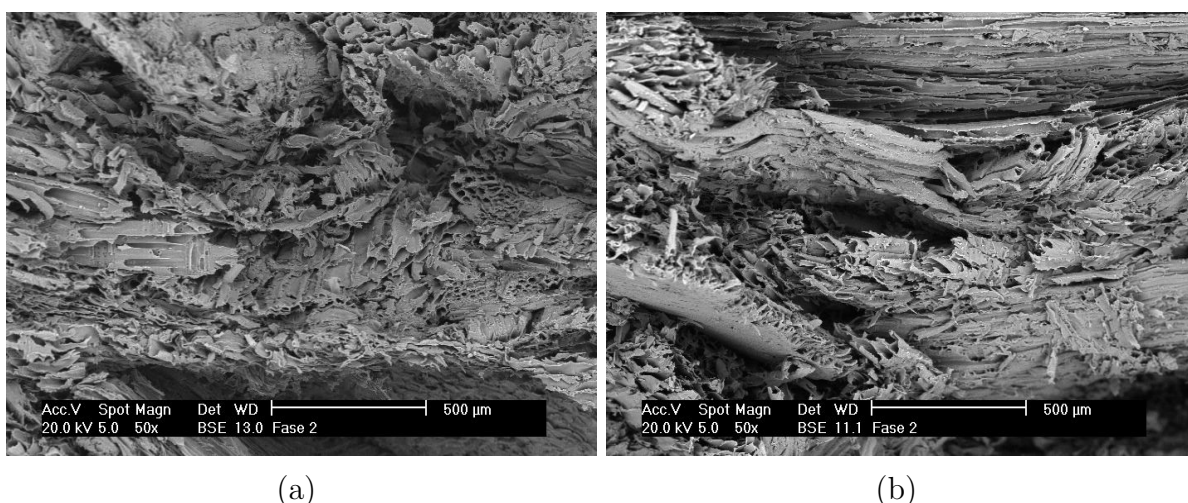


Figura 37: Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas

#### 4.4 FASE 2 - ETAPA 2

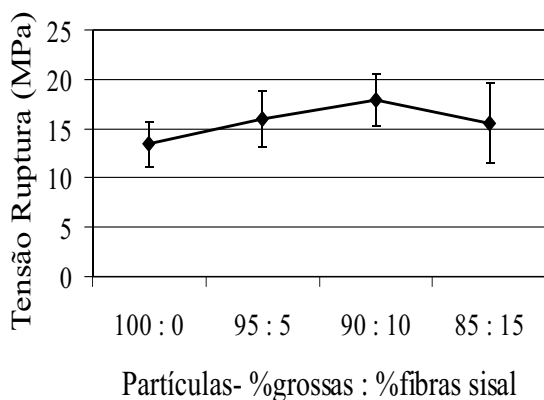
Os resultados da segunda etapa (segunda fase) são aqueles referentes a inclusão de fibras de sisal, fibras de bananeira, fibras de madeira e fibras de vassoura (5, 10 e 15% com comprimento de 2 cm) como reforço.

##### 4.4.1 Tensão de ruptura na flexão estática

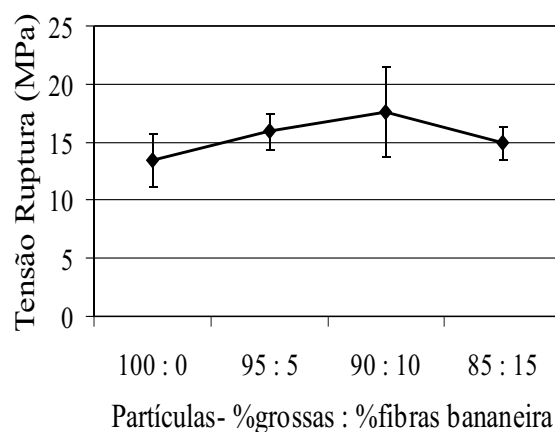
A Tabela 36 fornece a tensão de ruptura para as diversas composições utilizadas, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pelas Figuras 38 e 39, respectivamente partículas grossas reforçadas com fibras e partículas finas reforçadas com fibras.

Tabela 36: FASE 2 - Etapa 2 - Tensão de ruptura (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

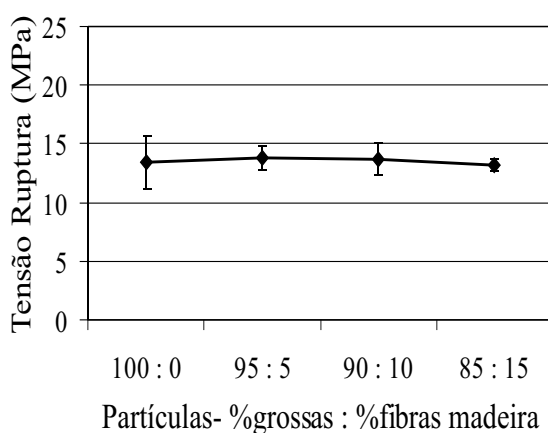
Amostra	Fibras											
	Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.
95%PG+5%fib.	15,96	2,79	17,5	15,92	1,59	10,0	13,79	1,02	7,4	15,37	2,12	13,8
90%PG+10%fib.	17,90	2,73	15,3	17,60	3,93	22,3	13,68	1,32	9,6	14,93	1,38	9,2
85%PG+15%fib.	15,59	4,02	25,8	14,91	1,45	9,7	13,21	0,48	3,6	15,72	2,19	13,9
95%PF+5%fib.	12,67	2,30	18,1	14,13	2,79	19,7	11,51	1,05	9,1	12,19	4,88	40,0
90%PF+10%fib.	13,12	3,94	30,0	13,50	1,11	8,2	10,83	1,15	10,6	12,67	2,84	22,4
85%PF+15%fib.	12,87	2,99	23,2	12,48	1,93	15,5	10,70	1,08	10,1	13,06	3,58	27,0



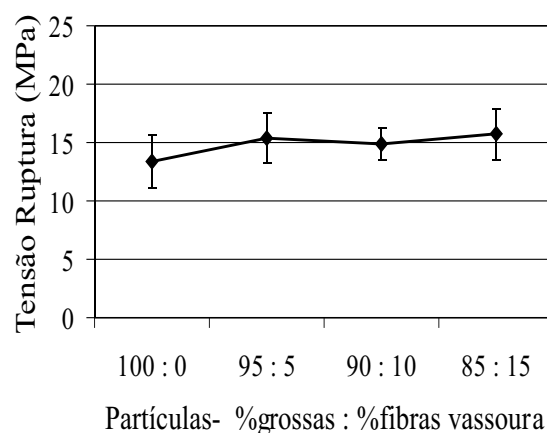
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 38: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Tensão de ruptura

Podemos notar que o acréscimo relativo com o reforço das fibras vegetais na tensão de ruptura na flexão estática depende do nível de reforço e do tipo de fibra. No caso das fibras de sisal e de bananeira a variação da tensão de ruptura em função da proporção de reforço é similar, mostrando um acréscimo relativo para reforço com 5 e 10% e um decréscimo para o reforço com 15% de fibras devido possivelmente a aglomeração das fibras durante o processo de enresinamento.

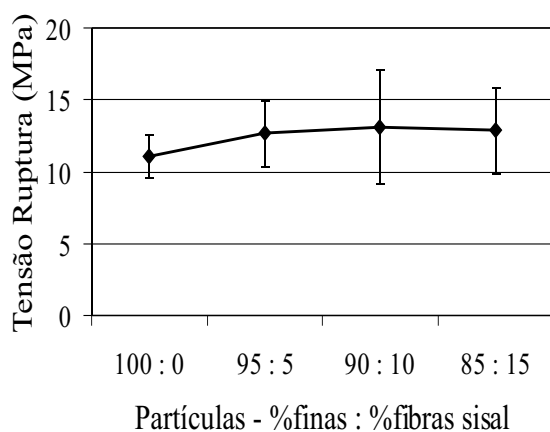
O acréscimo de fibra de madeira não tem resultado satisfatório. No caso do reforço utilizando fibra de vassoura o acréscimo relativo na tensão de ruptura foi inferior aquele observado para a fibra de sisal ou de bananeira, notando que neste caso o reforço com 15%

de fibras responde pelo máximo valor (15,72 MPa) devido em parte pela não aglomeração deste tipo de fibras.

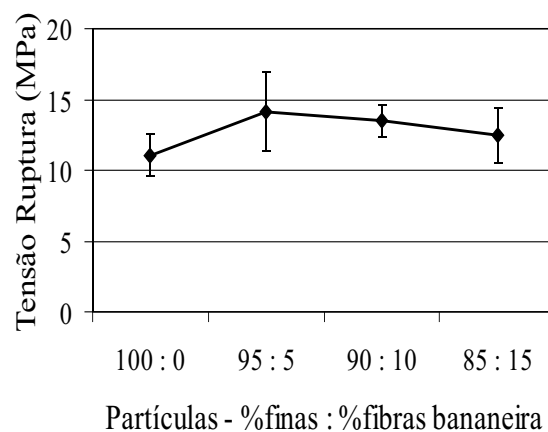
Os resultados obtidos pelo reforço com 5% de fibra de sisal ou de bananeira são superiores ao requeridos para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) que indica uma tensão de ruptura de 14,5 MPa para chapas de média densidade, classe 2. Com 10% de fibra de sisal ou de bananeira temos chapas compatíveis com a classe 3.

O melhor resultado para a tensão de ruptura na flexão estática foi 17,90 MPa com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

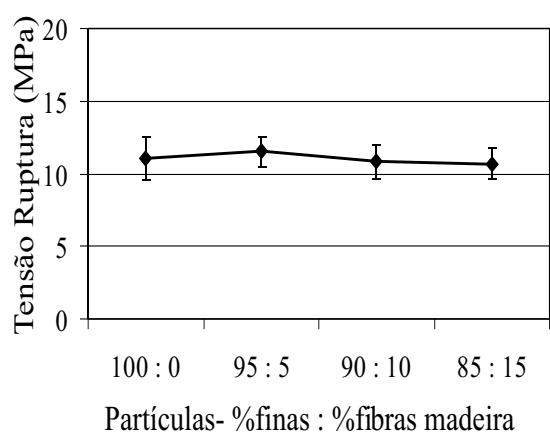
Estatisticamente existe diferença no valor da tensão de ruptura com o reforço de 10% de fibras de sisal, 10% de fibras de bananeira e 15% de fibras de vassoura quando comparamos com a chapa de controle com 100% de partículas grossas.



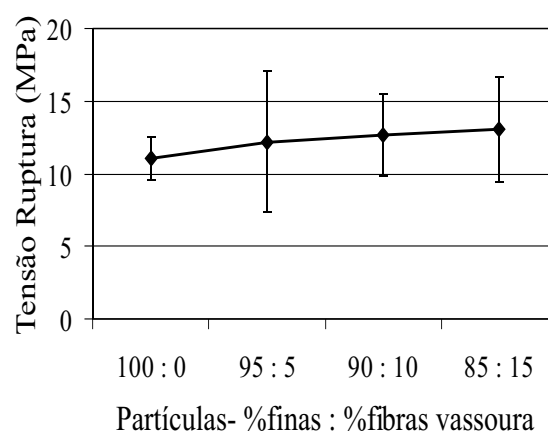
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 39: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Tensão de ruptura

Para as composições com partículas finas e fibras vegetais nota-se o mesmo comportamento das composições com partículas grossas evidenciando que o reforço deve ser feito com uma quantidade de fibras que não provoque a aglomeração destas, além de haver uma relação entre o diâmetro das fibras e as dimensões das partículas.

O melhor resultado para a tensão de ruptura na flexão estática foi 13,13 MPa com acréscimo de 5% de fibra de bananeira com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas finas.

Estatisticamente somente existe diferença no valor da tensão de ruptura com o reforço de 10% de fibras de bananeira quando comparamos com a chapa de controle com 100%

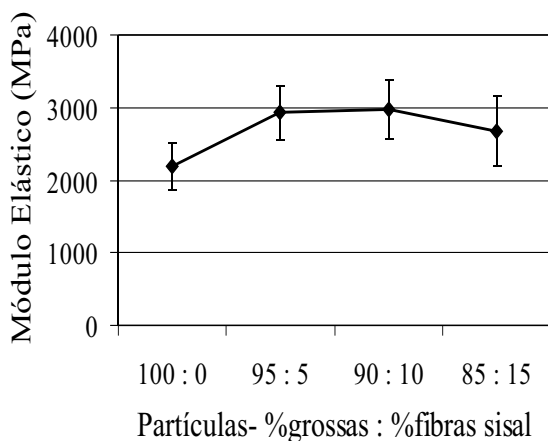
de partículas finas.

#### 4.4.2 Módulo de elasticidade

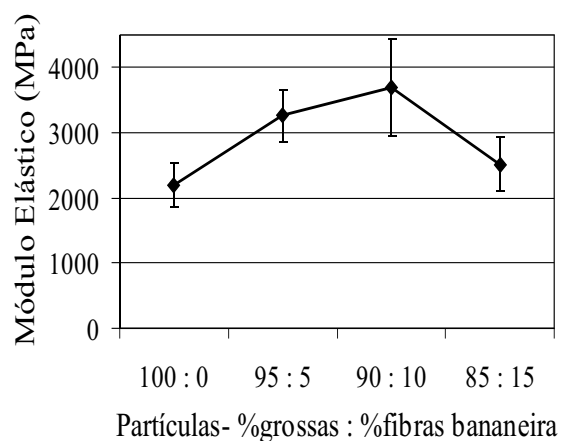
O módulo de elasticidade para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 37, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figuras 40 e 41, respectivamente partículas grossas reforçadas com fibras e partículas finas reforçadas com fibras.

Tabela 37: FASE 2 - Etapa 2 - Módulo de elasticidade (MPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

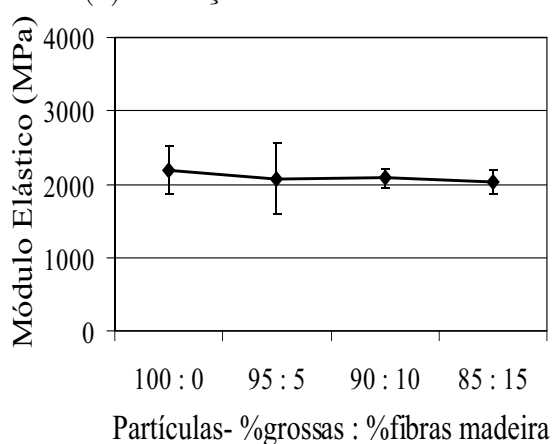
Amostra	Fibras											
	Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.
95%PG+5%fib.	2927	370	12,6	3261	398	12,2	2076	490	23,6	2332	697	29,8
90%PG+10%fib.	2975	399	13,4	3690	739	20,0	2080	126	6,1	2293	298	13,0
85%PG+15%fib.	2668	484	18,1	2509	414	16,5	2027	160	7,9	2317	513	22,1
95%PF+5%fib.	2297	303	13,2	2701	248	9,2	1930	225	11,7	2142	506	23,6
90%PF+10%fib.	2187	303	13,8	2744	127	4,6	1818	263	14,5	2047	657	32,1
85%PF+15%fib.	2085	336	16,1	2359	286	12,1	1749	341	19,5	2004	626	31,2



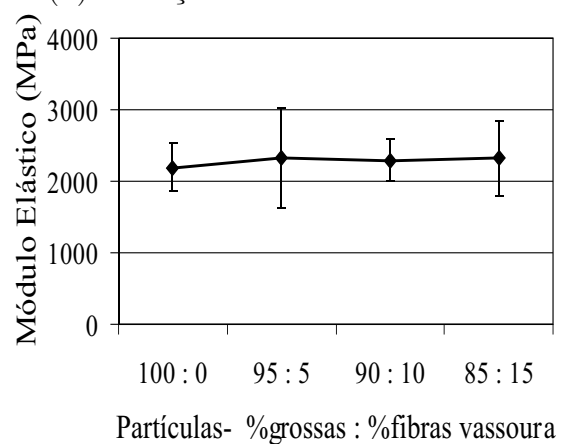
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



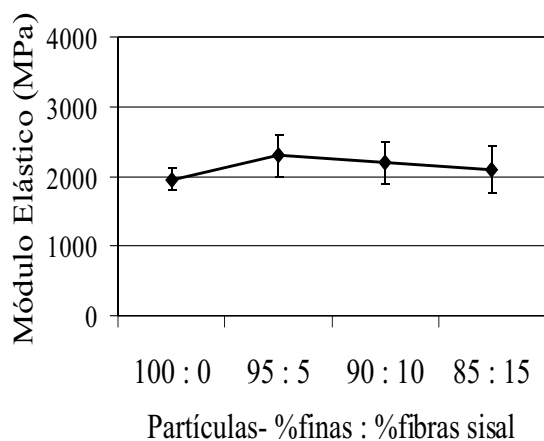
(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 40: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Módulo de elasticidade

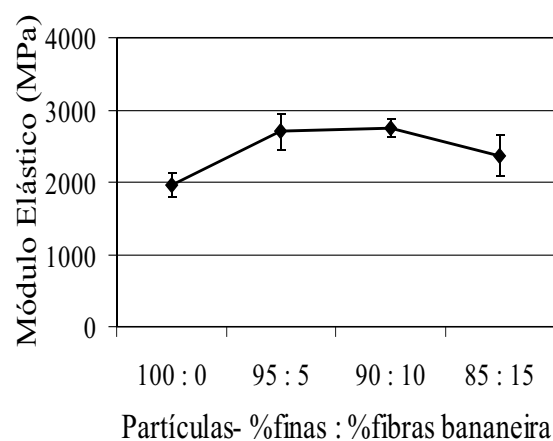
O melhor resultado para o módulo de elasticidade foi 3690 MPa com acréscimo de 10% de fibra da bananeira com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

Estatisticamente existe diferença no valor do módulo de elasticidade com o reforço de 5,10 e 15% de fibras de sisal, 5 e 10% de fibras de bananeira quando comparamos com a chapa de controle com 100% de partículas grossas.

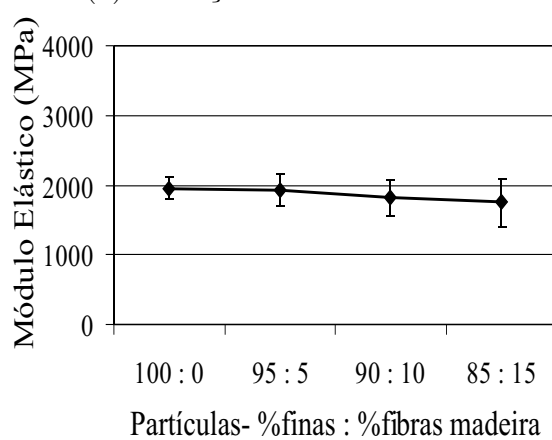




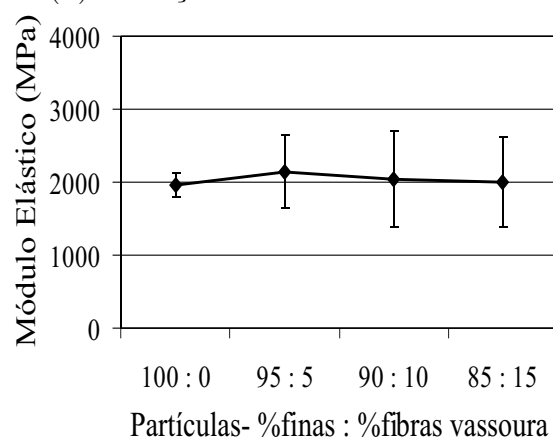
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 41: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Módulo de elasticidade

A variação para o módulo de elasticidade frente ao reforço com fibras vegetais variou relativamente de maneira parecida com a tensão de ruptura na flexão.

A aglomeração das fibras notada principalmente nas composições com 15% de fibras provocou um decréscimo relativo no módulo de elasticidade tanto para as partículas grossas como para as partículas finas.

O melhor resultado para o módulo de elasticidade foi 2744 MPa com acréscimo de 10% de fibra da bananeira com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas finas.

Estatisticamente existe diferença no valor do módulo de elasticidade com o reforço de 5% de fibras de sisal e 5,10 e 15% de fibras de bananeira quando comparamos com a

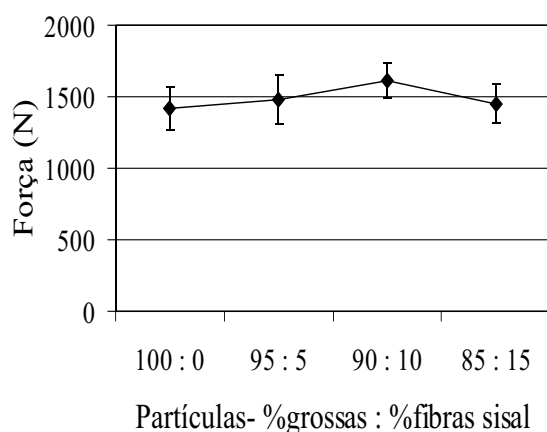
chapa de controle com 100% de partículas finas.

#### 4.4.3 Arrancamento de parafuso na fase

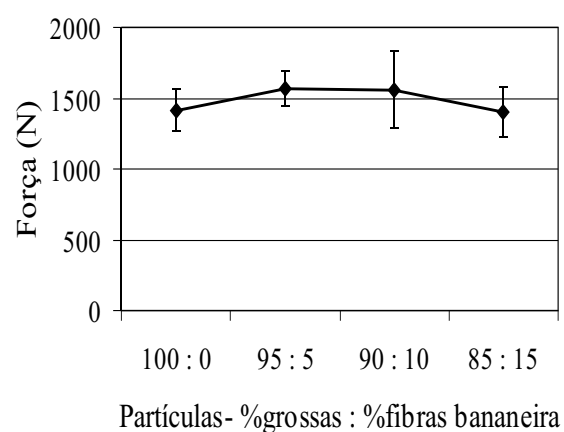
A força de arrancamento de parafuso na face das chapas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 38, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figuras 42 e 43, respectivamente partículas grossas reforçadas com fibras e partículas finas reforçadas com fibras.

Tabela 38: FASE 2 - Etapa 2 - Força de arrancamento de parafuso (N)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

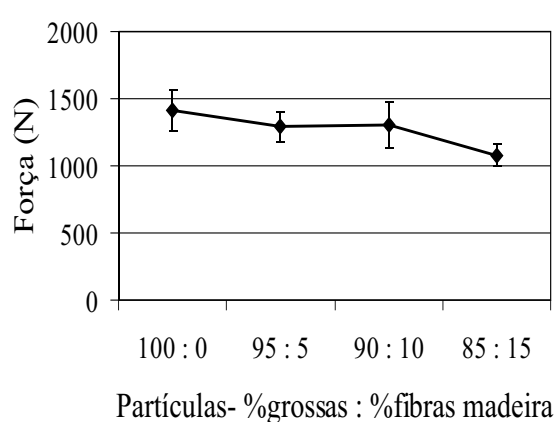
Amostra	Fibras											
	Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.
95%PG+5%fib.	1483	174	11,7	1569	121	7,7	1290	114	8,8	1320	129	9,8
90%PG+10%fib.	1609	122	7,6	1557	273	17,5	1300	173	13,3	1286	362	28,1
85%PG+15%fib.	1453	141	9,7	1404	176	12,5	1080	81	7,5	1246	217	17,4
95%PF+5%fib.	1071	170	15,9	1084	122	11,3	1052	135	12,8	1203	195	16,2
90%PF+10%fib.	983	187	19,0	1091	171	15,7	1064	124	11,6	1404	119	8,5
85%PF+15%fib.	998	139	13,9	919	259	28,2	1149	172	15,0	1182	138	11,7



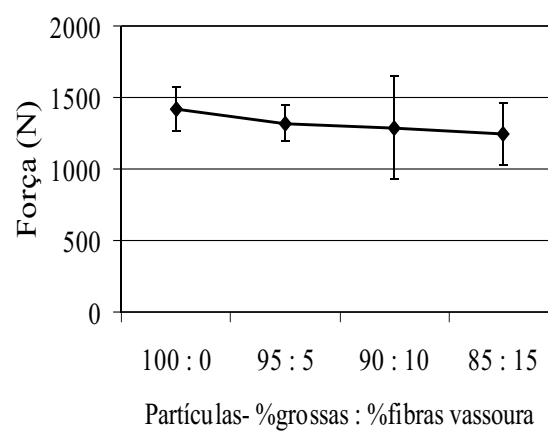
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



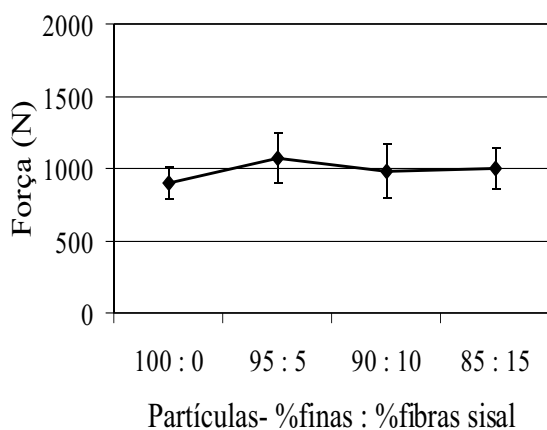
(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 42: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras

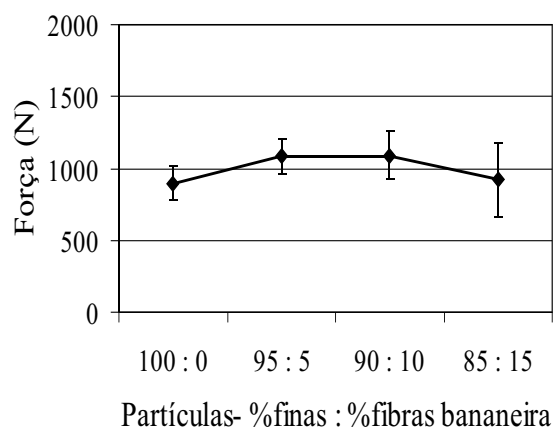
Para a chapa com 100% de partículas grossas reforçada com fibras vegetais o acréscimo relativo na força de arrancamento de parafuso na face foi inferior àquela observada para a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade.

O melhor resultado para a força de arrancamento de parafuso foi 1609 N com acréscimo de 10% de fibra de sisal com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

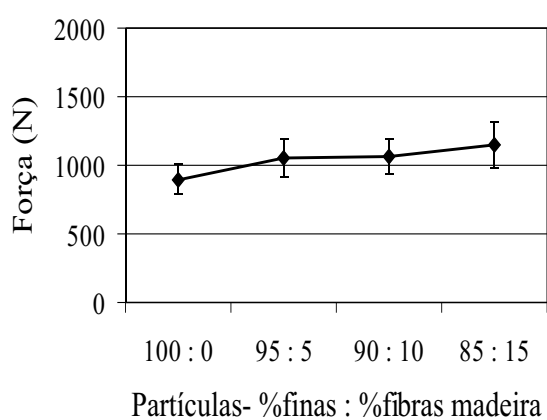
Estatisticamente não existe diferença no valor da força de arrancamento de parafuso com o acréscimo das fibras vegetais como reforço na chapa de controle com 100% de partículas grossas.



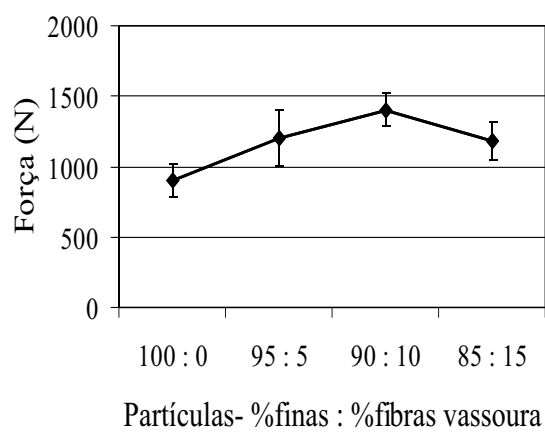
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 43: Partículas finas com fibras

O melhor resultado para a força de arrancamento de parafuso foi 1404 N com acréscimo de 10% de fibra de vassoura com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas finas.

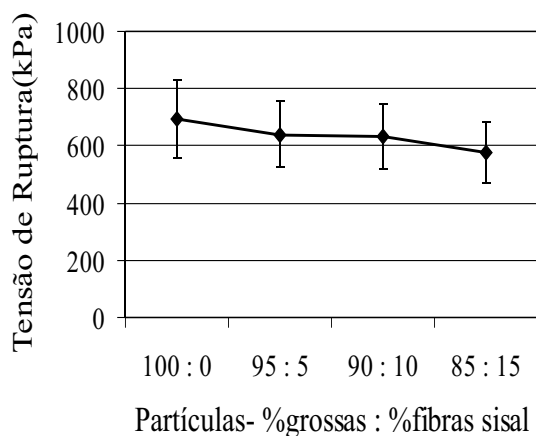
Estatisticamente existe diferença no valor da força de arrancamento de parafuso com o reforço de 5, 10 e 15% de fibras de vassoura e de 15% de fibras de madeira quando comparamos com a chapa de controle com 100% de partículas finas.

## 4.4.4 Tração Perpendicular (Ligação Interna)

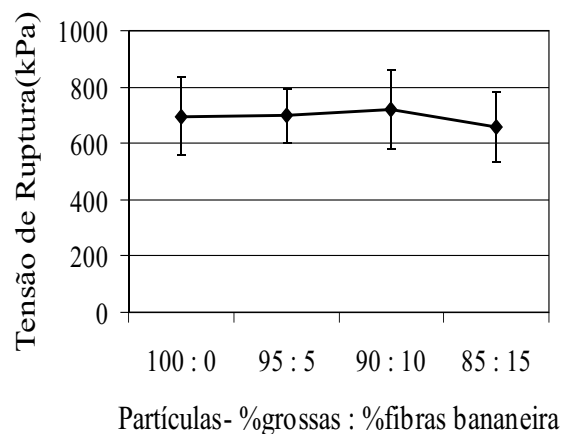
A Tensão na Tração Perpendicular (Ligação Interna) para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 39, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figuras 44 e 45, respectivamente partículas grossas reforçadas com fibras e partículas finas reforçadas com fibras.

Tabela 39: FASE 2 - Etapa 2 - Ligação interna(kPa)(média, desvio padrão e coeficiente de variação)

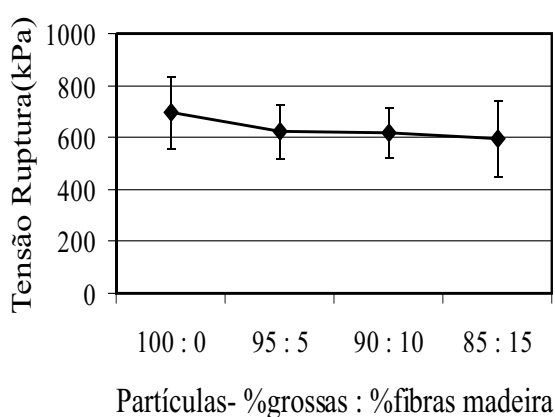
Amostra	Fibras											
	Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.
95%PG+5%fib.	640	115	18,0	697	98	14,1	622	105	16,9	595	112	18,8
90%PG+10%fib.	633	111	17,5	721	141	19,6	619	95	15,3	645	109	16,9
85%PG+15%fib.	575	107	18,6	658	123	18,7	594	145	24,4	588	203	34,5
95%PF+5%fib.	567	122	21,5	555	77	13,9	465	114	24,5	550	97	17,6
90%PF+10%fib.	608	130	21,4	567	82	14,5	455	106	23,3	600	109	18,2
85%PF+15%fib.	572	143	25,0	588	154	26,2	489	192	39,3	626	103	16,5



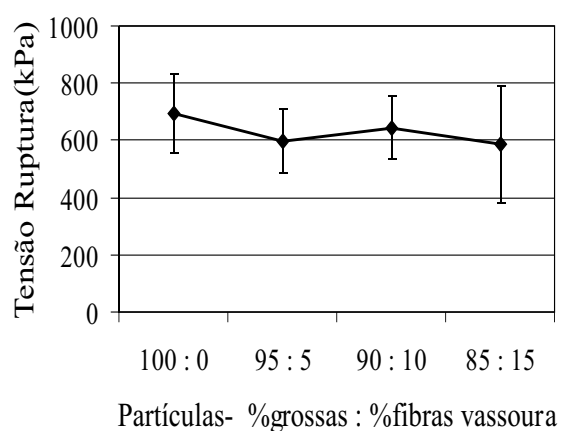
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



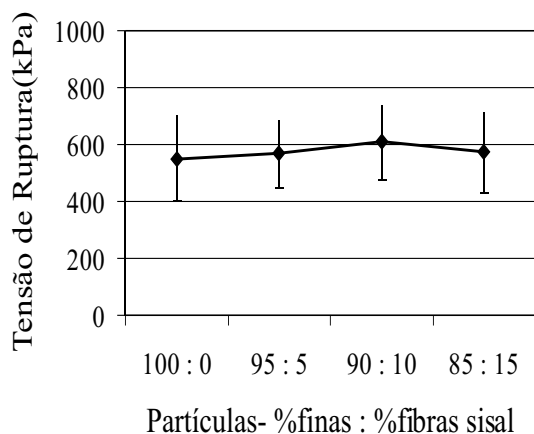
(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 44: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Ligação interna

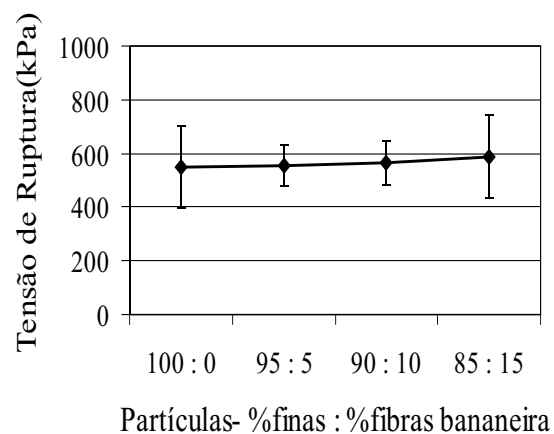
O reforço com fibras de sisal, madeira e vassoura afetaram negativamente a tensão na tração perpendicular à face da chapa (ligação interna), embora mantendo os valores superiores aqueles indicados para chapas de partículas, segundo a ANSI A208.1-1993 (Tabela 16) (0,40 e 0,45 MPa para chapas de média densidade, classe 1 e classe 2 respectivamente).

O melhor resultado para a ligação interna foi 721 kPa com acréscimo de 10% de fibra da bananeira com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

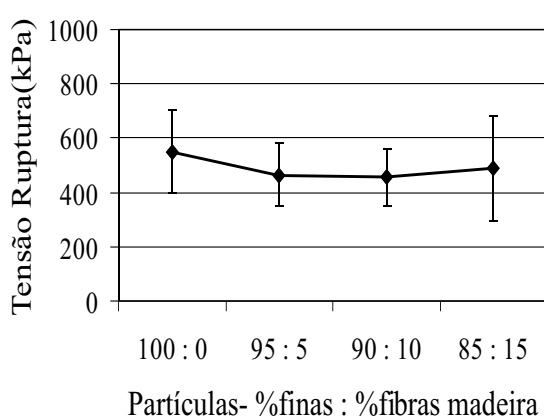
Estatisticamente não existe diferença no valor da ligação interna com o acréscimo das fibras vegetais como reforço na chapa de controle com 100% de partículas grossas.



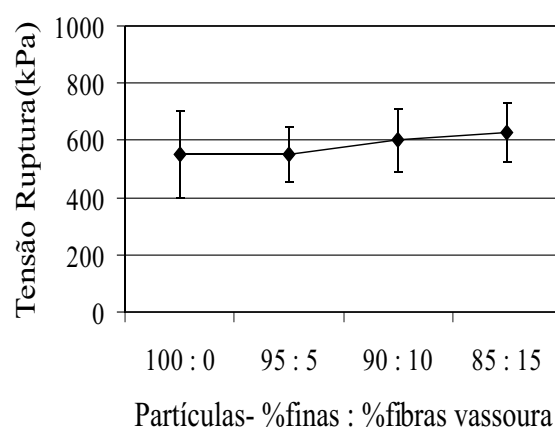
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 45: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Ligação interna

A variação de valores para a composição com partículas finas mostra um pequeno acréscimo relativo com o reforço de fibras de sisal, bananeira e vassoura.

De uma maneira geral, as fibras não tiveram um efeito de reforço na resistência mecânica no plano perpendicular a face da chapa, possivelmente devido ao posicionamento das fibras no plano da chapa e a aglomeração destas no interior da chapa.

O melhor resultado para a ligação interna foi 626 kPa com acréscimo de 15% de fibra de vassoura com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

Estatisticamente não existe diferença no valor da ligação interna com o acréscimo das fibras vegetais como reforço na chapa de controle com 100% de partículas finas.

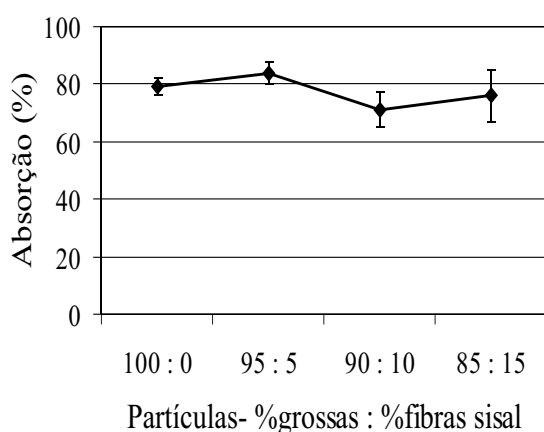
## 4.4.5 Absorção de água

A absorção de água após imersão por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 40, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figuras 46 e 47, respectivamente partículas grossas reforçadas com fibras e partículas finas reforçadas com fibras.

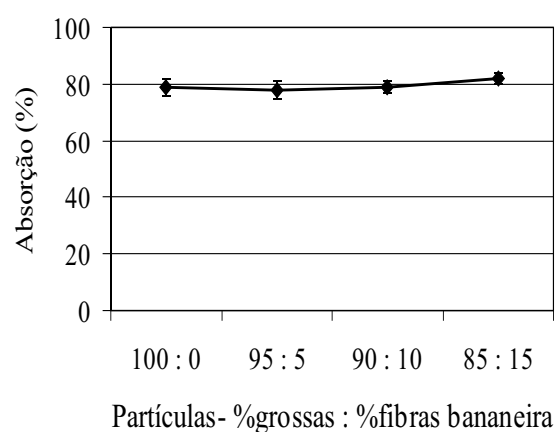
Tabela 40: FASE 2 - Etapa 2 - Absorção de água(%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

Amostra	Fibras											
	Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.
95%PG+5%fib.	84	4	4,8	78	3	3,8	87	5	5,7	75	3	4,0
90%PG+10%fib.	71	6	8,5	79	2	2,5	86	4	4,7	71	6	8,5
85%PG+15%fib.	76	9	11,8	82	2	2,4	88	2	2,3	61	5	8,2
95%PF+5%fib.	86	11	12,8	85	3	3,5	90	8	8,9	94	12	12,8
90%PF+10%fib.	86	8	9,3	85	7	8,2	89	7	7,9	75	8	10,7
85%PF+15%fib.	87	12	13,8	87	7	8,0	84	9	10,7	71	7	9,9

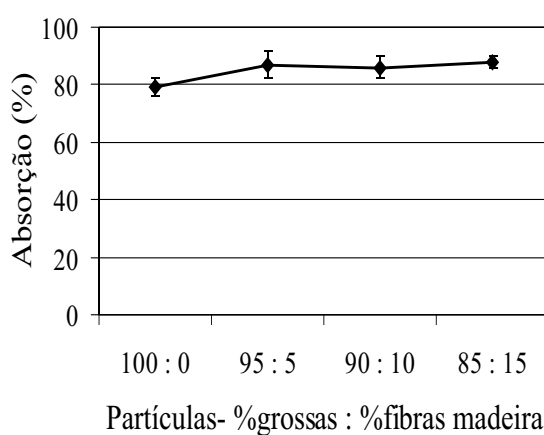




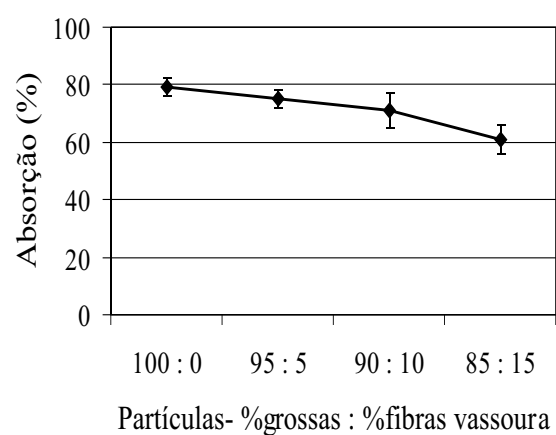
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

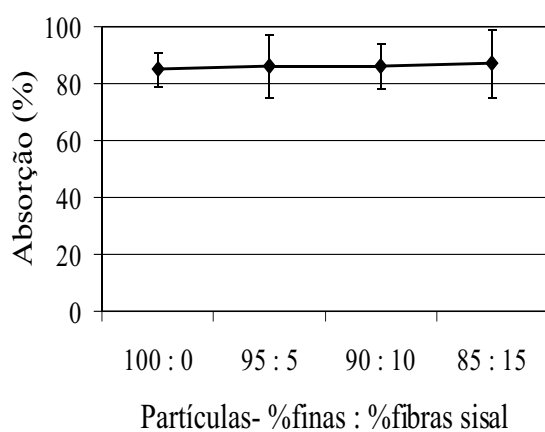
Figura 46: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Absorção de água

A variação da absorção de água após imersão por 24 horas frente à adição de fibras vegetais foi instável principalmente para adição de fibras de sisal, bananeira e madeira.

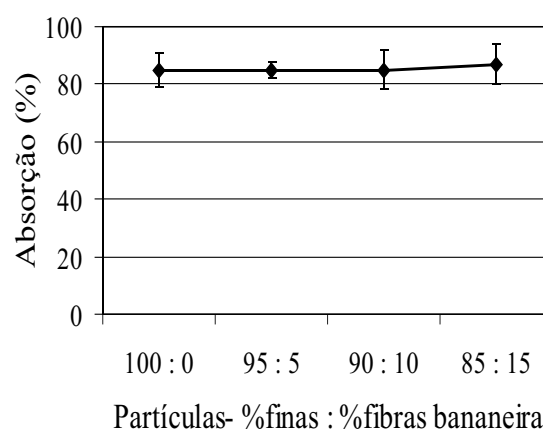
A adição de fibras de vassoura mostrou-se ser relativamente a melhor na diminuição no índice de absorção de água após imersão por 24 horas.

O melhor resultado para absorção de água foi 61% com acréscimo de 15% de fibra da vassoura com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

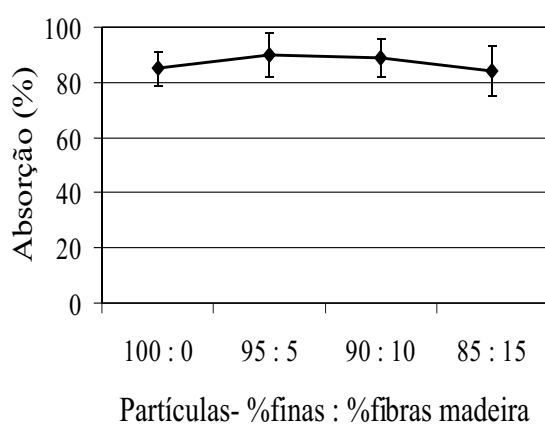
Estatisticamente somente existe diferença no valor da tensão de ruptura com o reforço de 15% de fibras de vassoura quando comparamos com a chapa de controle com 100% de partículas grossas.



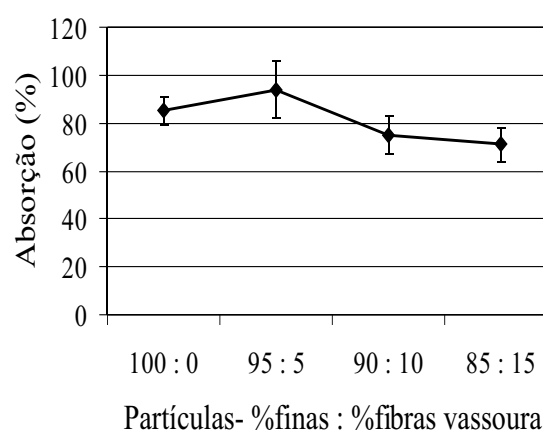
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 47: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Absorção de água

O comportamento para a composição com partículas finas foi similar a composição com partículas grossas. Não se tem uma tendência na variação da absorção frente ao reforço com fibras vegetais.

O melhor resultado para absorção de água foi 71% com acréscimo de 15% de fibra da vassoura com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas finas.

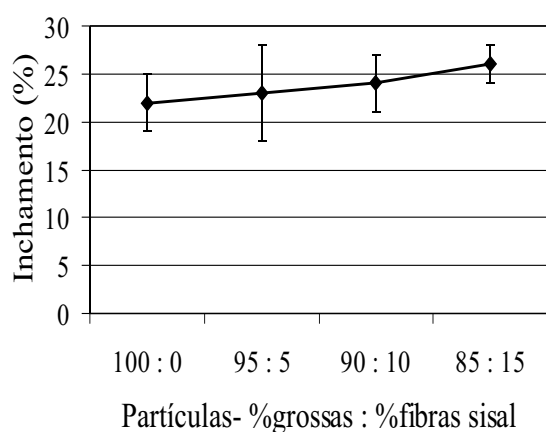
Estatisticamente não existe diferença no valor da absorção de água com o acréscimo das fibras vegetais como reforço na chapa de controle com 100% de partículas finas.

## 4.4.6 Inchamento em espessura

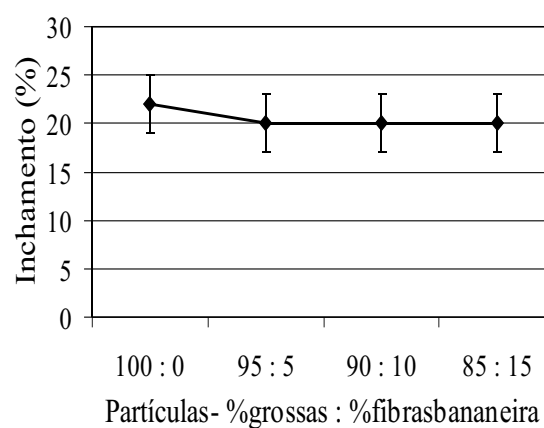
O inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas para as diversas composições utilizadas é fornecida pela Tabela 41, os valores apresentados são a média aritmética e o desvio padrão obtidos dos testes. A variação dos valores pode ser mais bem acompanhada pela Figuras 48 e 49, respectivamente partículas grossas reforçadas com fibras e partículas finas reforçadas com fibras.

Tabela 41: FASE 2 - Etapa 2 - Inchamento em espessura(%) (média, desvio padrão e coeficiente de variação)

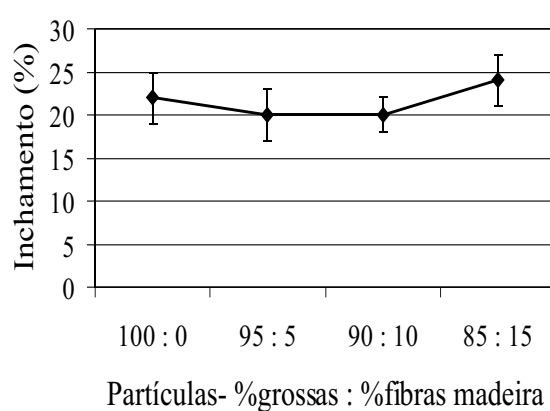
Amostra	Fibras											
	Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.	m.	d.p.	c.v.
95%PG+5%fib.	23	5	21,7	20	3	15,0	20	3	15,0	16	1	6,3
90%PG+10%fib.	24	3	12,5	20	3	15,0	20	2	10,0	13	2	15,4
85%PG+15%fib.	26	2	7,7	20	3	15,0	24	3	12,5	15	4	26,7
95%PF+5%fib.	17	5	29,4	21	2	9,5	16	2	12,5	12	2	16,7
90%PF+10%fib.	18	1	5,6	20	2	10,0	13	2	15,4	15	1	6,7
85%PF+15%fib.	19	3	15,8	19	3	15,8	13	2	15,4	14	1	7,1



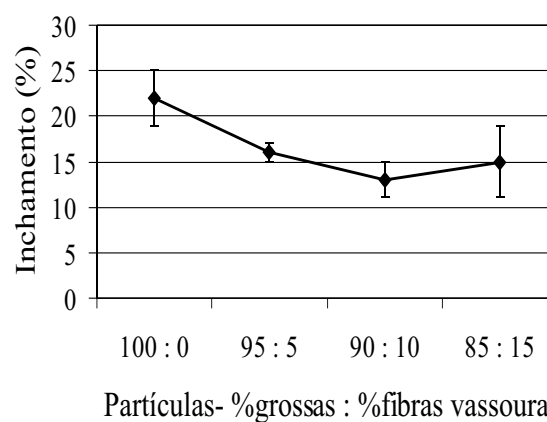
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



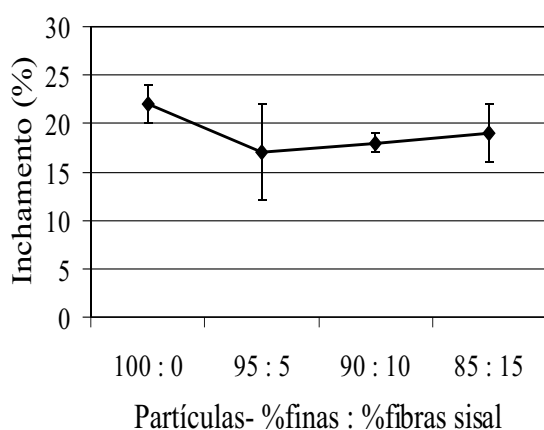
(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 48: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas grossas com fibras - Inchamento em espessura

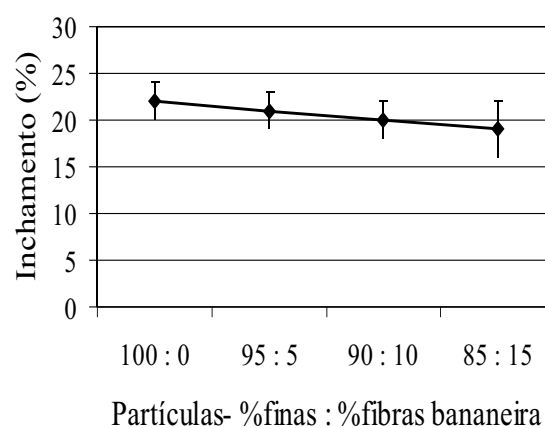
A variação do inchamento em espessura frente ao reforço da composição com partículas grossas com fibras vegetais não mantém nenhuma tendência o mesmo observado no caso da absorção de água. Apenas com o acréscimo de fibras de vassoura houve uma redução significativa no inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas.

O melhor resultado para o inchamento em espessura foi 13% com acréscimo de 10% de fibra da vassoura com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

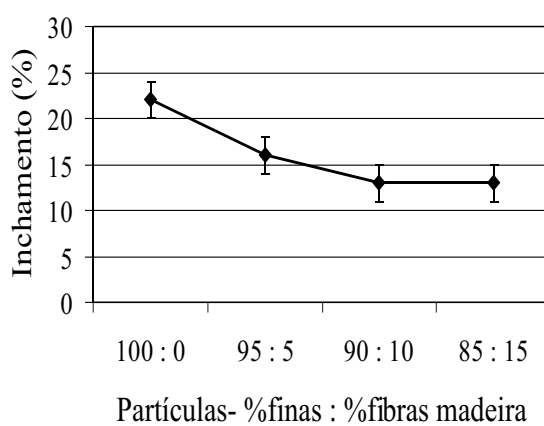
Estatisticamente existe diferença no valor do inchamento em espessura com o reforço de 5, 10 e 15% de fibras de vassoura quando comparamos com a chapa de controle com 100% de partículas grossas.



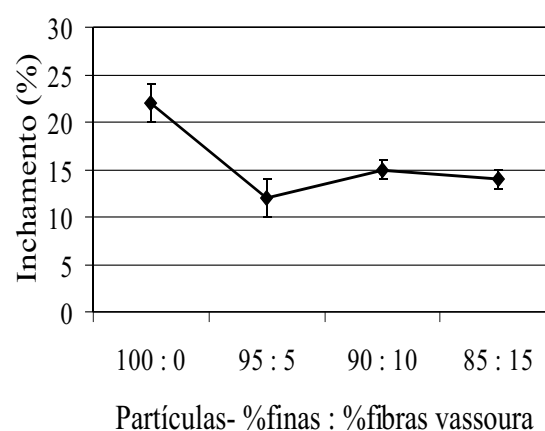
(a) Reforço com fibras de sisal



(b) Reforço com fibras de bananeira



(c) Reforço com fibras de madeira



(d) Reforço com fibras de vassoura

Figura 49: FASE 2 - Etapa 2 - Partículas finas com fibras - Inchamento em espessura

Para a composição com partículas finas, houve uma diminuição significativa no inchamento em espessura após imersão em água por 24 horas no caso da adição de fibras de madeira e de vassoura.

O melhor resultado para o inchamento em espessura foi 12% com acréscimo de 5% de fibra da vassoura com 2 cm de comprimento para as chapas com partículas grossas.

Estatisticamente existe diferença no valor do inchamento em espessura com o reforço de 5, 10 e 15% de fibras de vassoura e com o reforço de 5, 10 e 15% de fibra de madeira quando comparamos com a chapa de controle com 100% de partículas finas.

#### 4.4.7 Síntese dos resultados

A síntese dos resultados da FASE 2, pode ser acompanhada pela Tabela 42. Os melhores resultados de cada propriedade estão grifados.

Nota-se que os resultados máximos foram obtidos na quase totalidade com o acréscimo de fibras sendo limitado em 10%. Apenas com a fibra de vassoura, que não tinha problemas de aglomeração durante o processo de mistura, conseguiu determinar o valor máximo para ligação interna na chapa com partículas grossas e absorção de água tanto na chapa com partículas grossas quanto com partículas finas.

Os melhores resultados conseguidos nos valores da absorção de água e inchamento em espessura após imersão por 24 horas foram com o acréscimo de fibras de vassoura, possivelmente devido ao acréscimo na adesão entre fibras e partículas conseguida pela característica da superfície destas fibras (Figura 9(e)).

Tabela 42: Resumo Geral dos Resultados da FASE 2

PROPRIEDADE	Part.	F1	F2	Reforço com fibras											
				Sisal			Bananeira			Madeira			Vassoura		
				5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Tensão de ruptura na flexão estática (MPa)	PG PF	7,67 10,57	13,41 11,08	15,96 12,67	<b>17,90</b> 13,12	15,59 12,87	17,60 <b>14,13</b>	14,91 12,48	13,79 11,51	13,68 10,83	15,37 12,19	14,93 12,67	15,72 13,06		
Módulo de elasticidade na flexão estática (GPa)	PG PF	1968 1868	2192 1957	2927 2297	2975 2187	2668 2085	<b>3690</b> <b>2744</b>	2509 2359	2076 1930	2080 1818	2332 2142	2293 2047	2317 2004		
Força de arrancamento de parafuso (N)	PG PF	760 893	1416 898	1483 1071	<b>1609</b> 983	1453 998	1557 1091	1404 919	1290 1052	1300 1064	1320 1203	1286 <b>1404</b>	1246 1182		
Ligação interna (kPa)	PG PF	132 232	695 550	640 567	633 608	575 572	<b>721</b> 567	658 588	622 465	619 455	595 550	645 600	588 <b>626</b>		
Absorção de água (%)	PG PF	110 91	78 85	84 86	71 86	76 87	79 85	82 87	87 90	86 89	75 94	71 75	<b>61</b> <b>71</b>		
Inchamento em espessura (%)	PG PF	48 26	22 22	23 17	24 18	26 19	20 20	20 19	20 16	20 13	16 <b>12</b>	<b>13</b> 15	15 14		
F1 - chapa de controle da primeira Fase F2 - chapa de controle da segunda Fase PG - chapa com partículas grossas PF - chapa com partículas finas															

#### 4.4.8 Microestrutura

As fotomicrografias MEV da superfície fraturadas das chapas da segunda fase com partículas grossas e fibras de sisal são mostradas na Figura 50. Pode-se notar o posicionamento das fibras no plano da chapa, entre as partículas. A aglomeração das fibras pode ser notada na Figura 50(b). Na Figura 50(a) podemos notar uma falha da aderência na interface partícula/fibra.

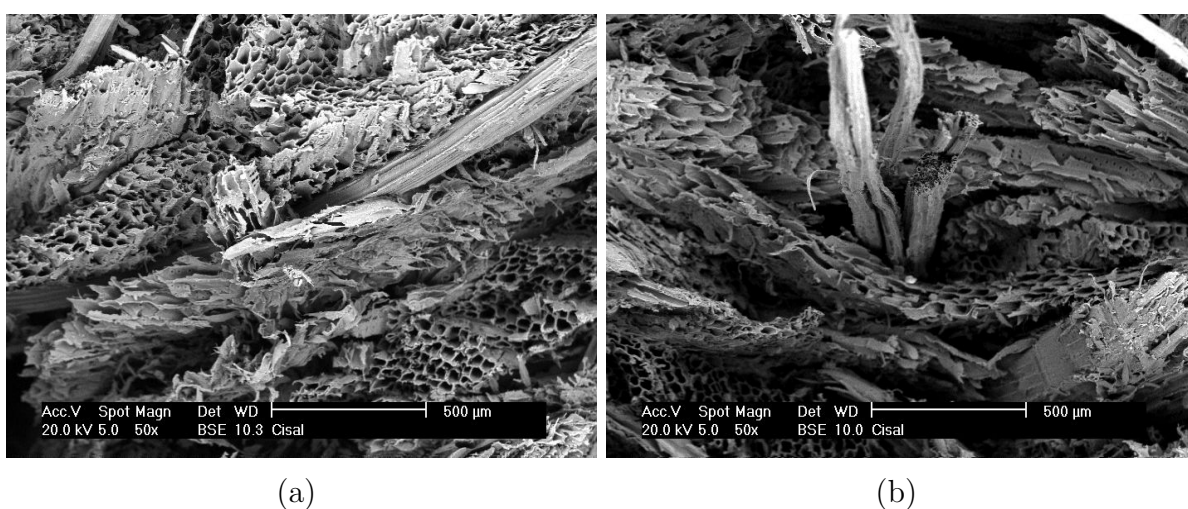


Figura 50: Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras de sisal

Novamente a fotomicrografia MEV mostrada na Figura 51(b) revela aglomeração das fibras de bananeira.

No caso das chapas com partículas grossas reforçadas com fibras de madeira, nota-se que devido ao tamanho e diâmetro da fibra, houve uma maior aglomeração destas (Figura 52(a) e 52(a)).

A Figura 53 apresenta as fotomicrografias MEV das chapas com partículas grossas reforçadas com fibras de sorgo-vassoura.

De um modo geral podemos notar que existe uma menor aglomeração das fibras de sorgo-vassoura, quando comparadas às outras fibras. Devido ao diâmetro da fibra ser



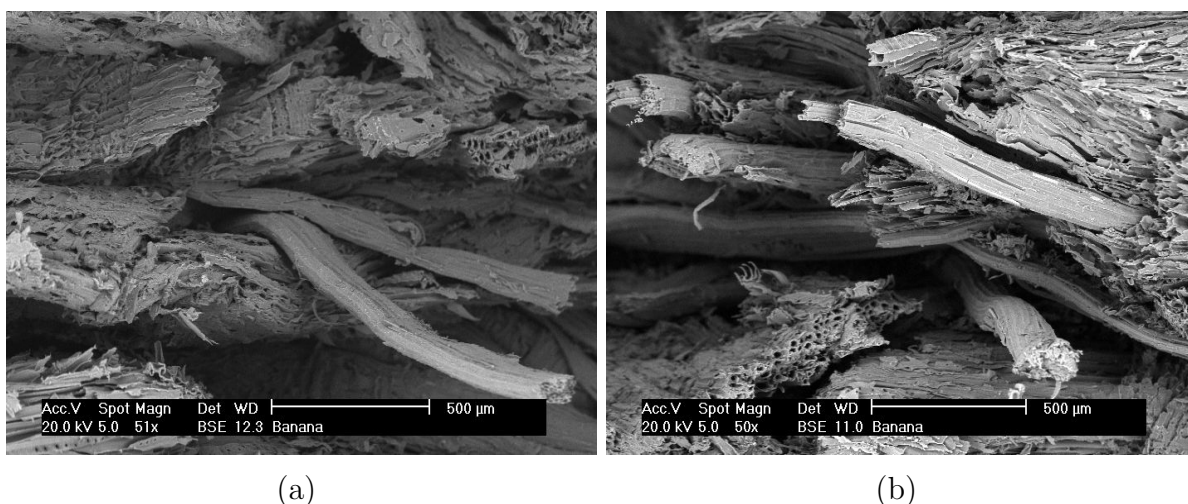


Figura 51: Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras da bananeira

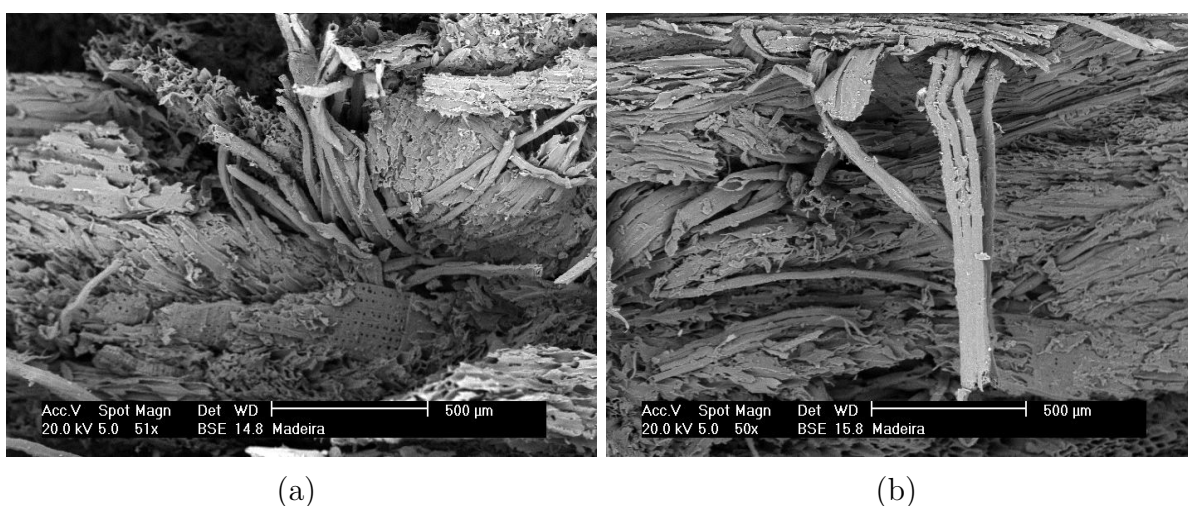


Figura 52: Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras da madeira

maior que os demais tipos, a quantidade de fibras adicionadas é menor.

Pode-se notar vazios de arrancamento das fibras da matriz (Figura 53(b)), característica não encontrada na face de fratura da chapas com as outras fibras.

Sem dúvida os espinhos que aparecem na superfície da fibra de sorgo-vassoura (Figura 53(c)), favoreceram a aderência, melhorando a interface de contato entre as fibras e as partículas de madeira.

A Figura 53(d) mostra claramente a dificuldade da conformação da partícula plana

em torno da fibra arredondada.

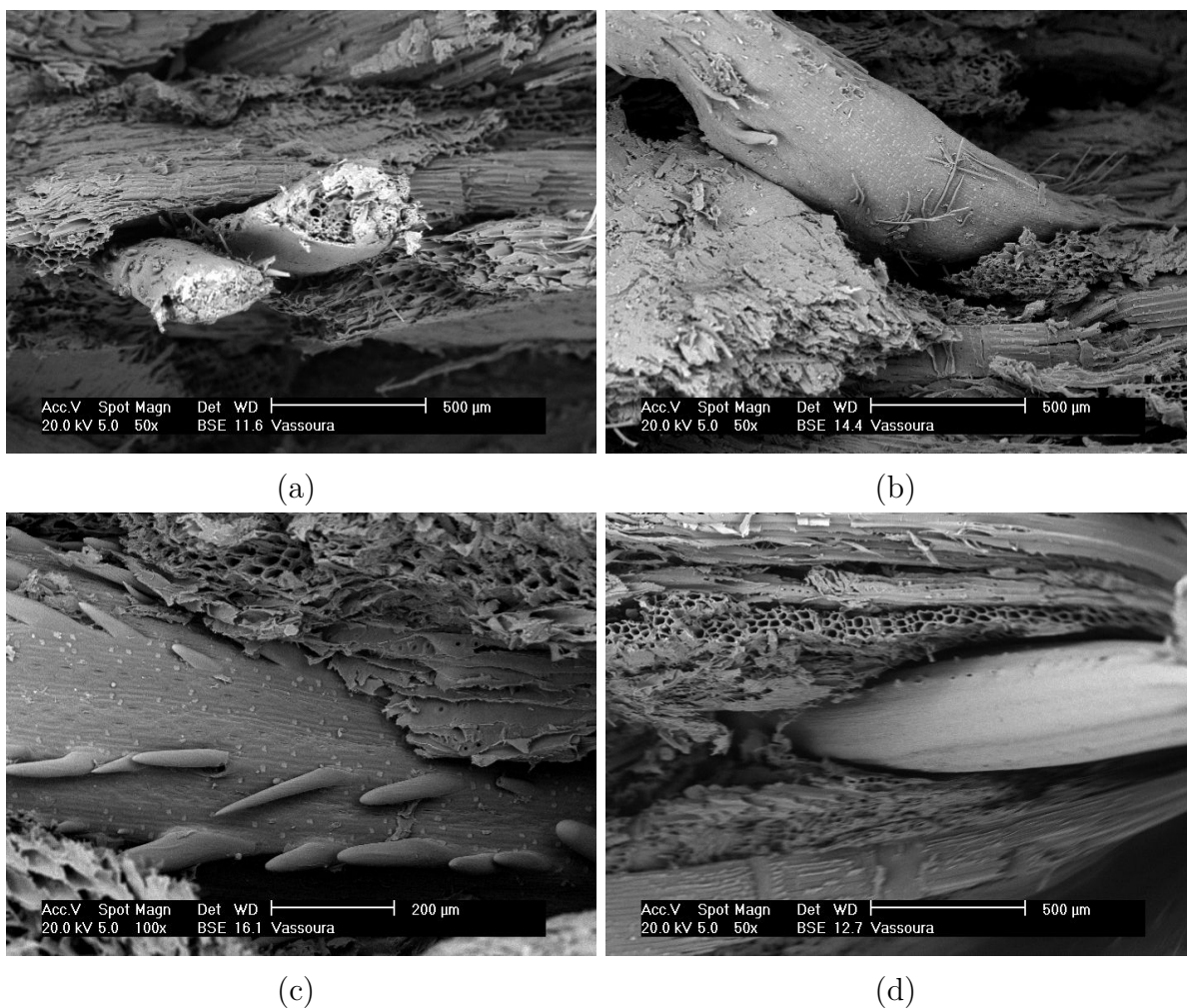


Figura 53: Fotomicrografias MEV da superfície fraturadas da chapa da FASE 2 feitas com partículas grossas reforçada com fibras de vassoura

#### 4.5 ADESÃO NO COMPÓSITO PARTÍCULA/FIBRA

Os compósitos à base de madeira, ou seja, chapas de partículas e chapas de fibras são o resultado da união de partículas através do uso de um adesivo. A eficiência deste adesivo, proporcionando a ligação entre as diversas partículas, indicará o grau de resistência mecânica do compósito.

A adesão entre as partículas deve acontecer em toda a sua extensão de contato, con-

siderando distribuição contínua do adesivo (Figura 54).

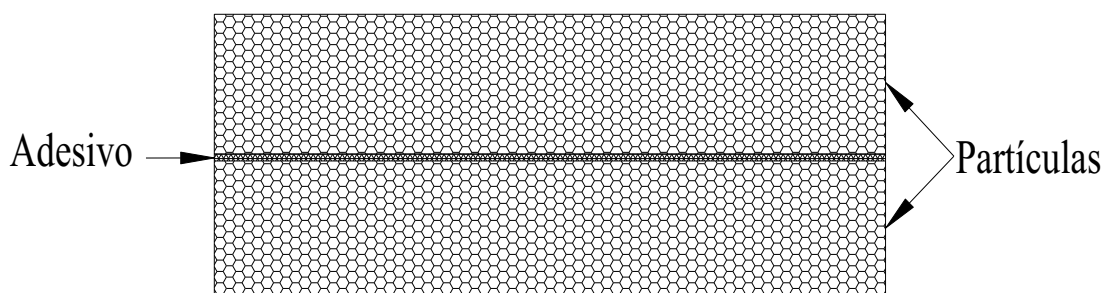


Figura 54: Adesão entre partículas

No caso do presente trabalho, existe a mistura de fibras e partículas. As fibras que se posicionam no plano da chapa devido às condições de formação do colchão e prensagem, assumem uma posição entre as partículas criando zonas sem adesão, ou de adesão deficiente, na região de contato entre a fibra e partículas (Figura 55).

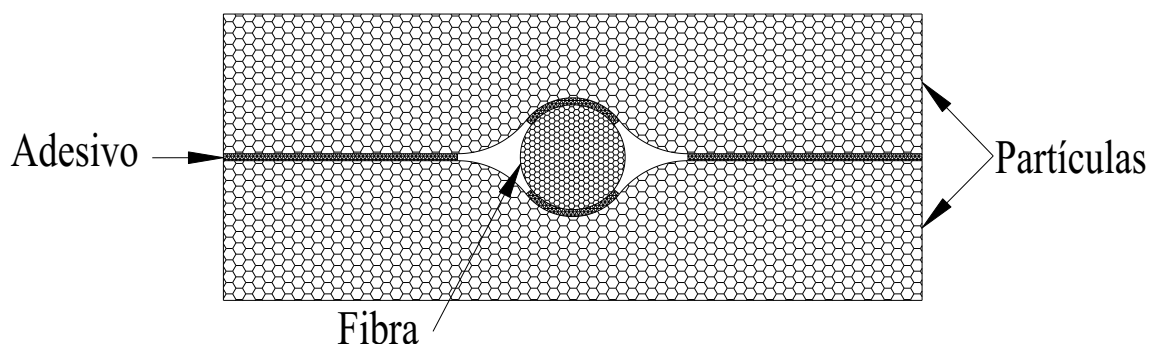


Figura 55: Adesão entre partículas

O contato íntimo entre as partículas nos compósitos à base de madeira depende da pressão durante o processo de prensagem, na conformação da chapa. Quanto maior for a densidade da chapa em relação às partículas originais, ou seja quanto maior a razão de compactação (Equação 2), melhor a possibilidade de haver após a prensagem o contato íntimo entre as partículas, originando a adesão adequada.

No caso do compósito partícula/fibra, a fibra devido seu formato arredondado, oca-

siona uma dificuldade no contato entre as partículas e entre as partículas e as fibras. Esta zona sem adesão pode depender do diâmetro da fibra, ou mais precisamente da relação entre o diâmetro da fibra e a espessura da partícula, bem como da deformação da partícula e da fibra durante a conformação.

#### 4.5.1 Modelagem da zona de conformação Fibra-Partícula

Para estudar a zona de conformação fibra/partícula, foi utilizado um modelo de contato entre partícula e fibra sob carregamento através de elemento-finito. As premissas deste modelo são as seguintes:

- razão de compactação da partícula variando de 0 a 50%;
- fibra considerada totalmente redonda, não sofrendo deformação;
- largura da partícula de 2 mm;
- espessura da partícula de 0,4 mm;
- diâmetro da fibra variando de 0,5 a 0,05 mm;

A discretização dos elementos utilizada, condição de carregamento, apoios e base indeformável pode ser vista na Figura 56. O programa utilizado para modelagem foi o FEAP<sub>pv</sub> (TAYLOR, 2001).

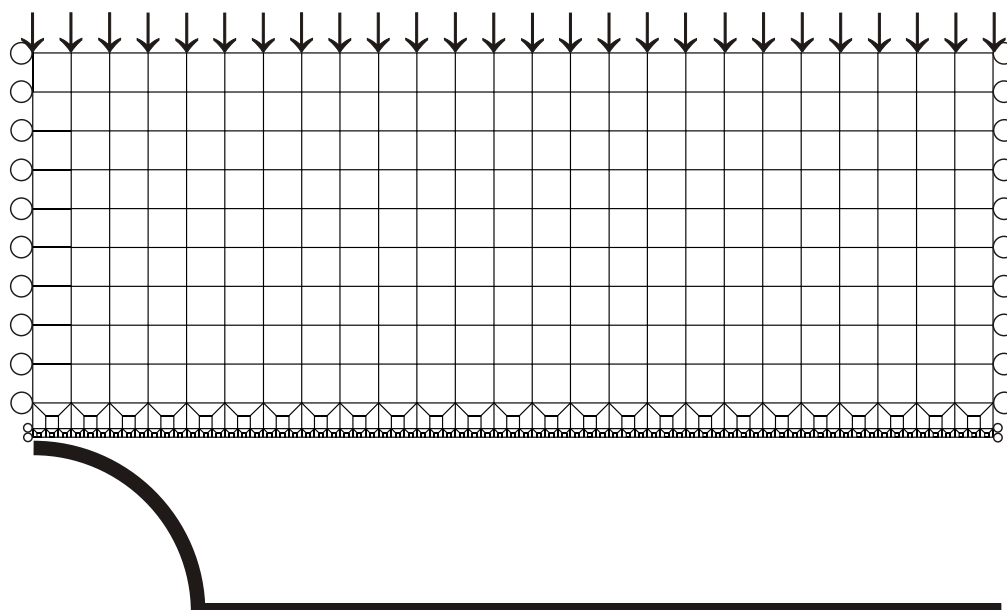


Figura 56: Modelo para análise com elemento finito

#### 4.5.2 Resultados da modelagem

O resultado da modelagem para as fibras com diferentes diâmetros (0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 mm) pode ser vista na Figura 57 para uma razão de compactação de 36%.

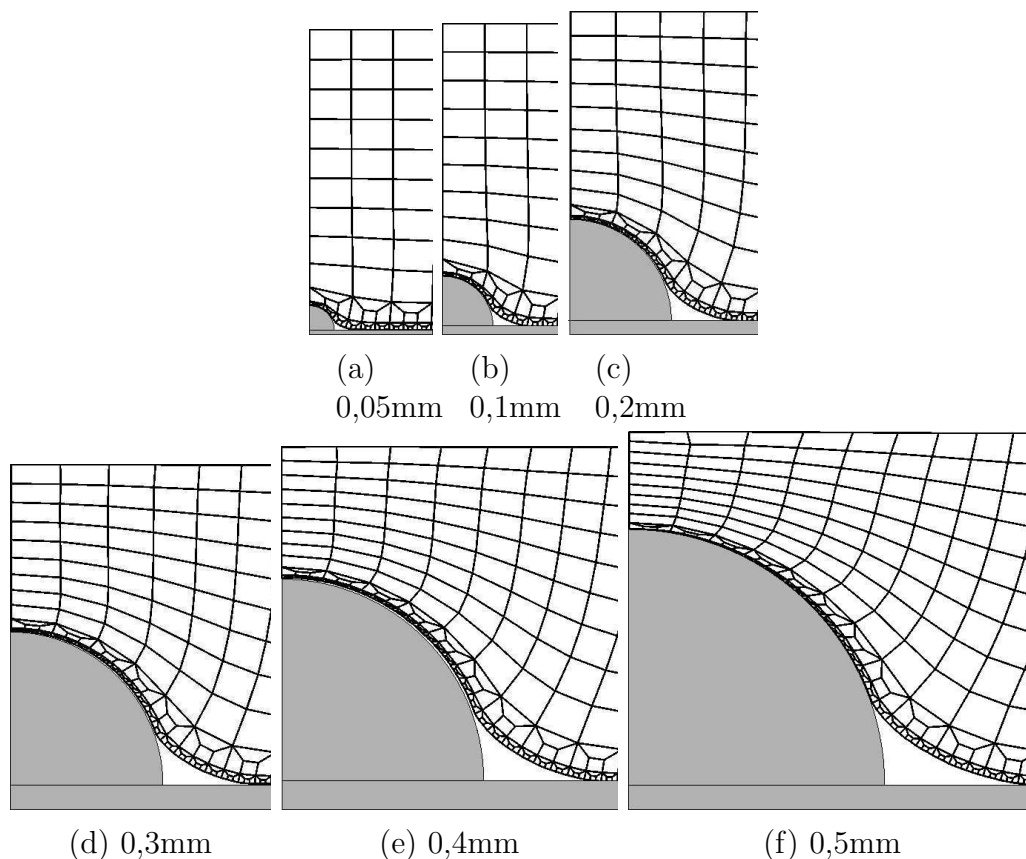


Figura 57: Resultado da modelagem para fibras com diferentes diâmetros

A geometria da zona de não-aderência pode ser acompanhada pela Figura 58.

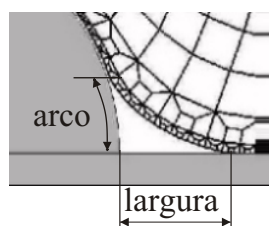


Figura 58: Geometria da zona de não-aderência

A superfície de contato entre as partículas determina o quanto o conjunto de partículas vai trabalhar como um sistema interligado. Na Figura 59 o gráfico relaciona a razão de compactação versus a superfície da partícula sem contato para os diversos diâmetros de fibras testados na simulação.

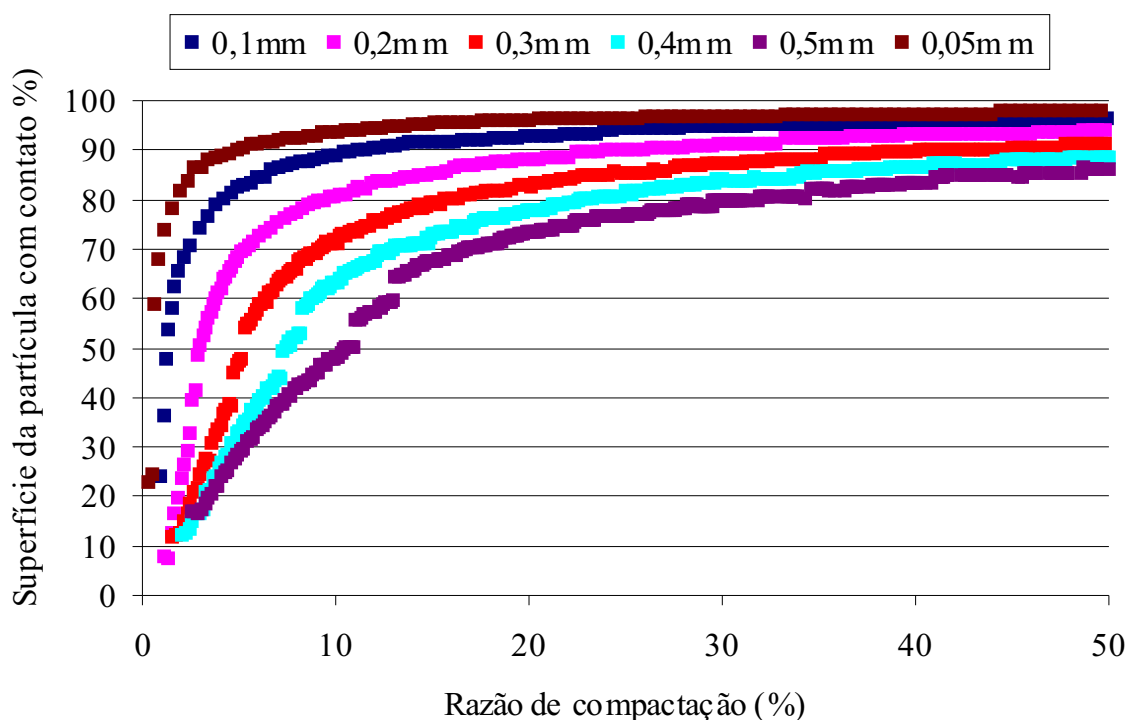


Figura 59: Superfície de contato entre partículas em função da razão de compactação

Verifica-se que quanto maior a fibra maior interferência no contato entre as partículas, principalmente para razão de compactação inferior a 30%.

Para razão de compactação superior a 30%, verifica-se um acréscimo relativo na superfície de contato entre as partículas muito pequeno.

Segundo MALONEY (1977), para se produzir chapas de média densidade, uma determinada espécie de madeira é adequada quando temos a razão de compactação de 1,3. Isto determina o uso de uma pressão de consolidação do colchão de partículas que assegura uma melhor ligação entre as partículas.

Assim o valor da simulação confirma o que é indicado por MALONEY (1977).

Verifica-se portanto que a simulação de contato entre uma fibra redonda e uma partícula plana pode ser também um modelo para o contato entre duas partículas planas.

Para razão de compactação próxima de 50%, verifica-se que a superfície da partícula com contato assume um valor constante que depende do diâmetro da fibra. Temos uma

superfície de contato de 97,8% e 86,3% para a fibra com 0,05 mm e 0,5 mm de diâmetro respectivamente, os outros valores são intermediários dependendo do diâmetro da fibra.

A conformação da partícula em torno da fibra é representada na Figura 60 que fornece o perímetro da fibra sem contato (%) em função da razão de compactação (%).

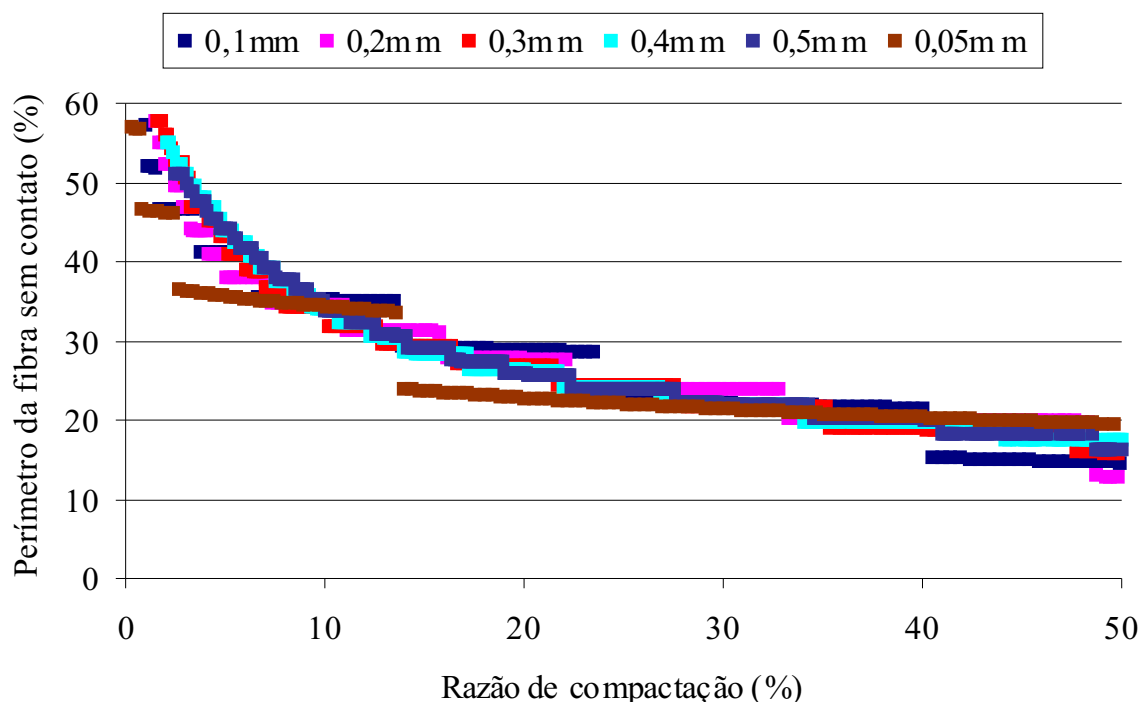


Figura 60: Perímetro da fibra sem contato em função da razão de compactação

Nota-se que existe uma variação que independe do diâmetro da fibra, ou não existe uma tendência diferente em função do diâmetro da fibra.

Para uma razão de compactação de 30%, temos um valor bastante uniforme, em torno de 22,5% do perímetro da fibra se encontra sem contato.

Esta parcela da superfície sem contato deve ser levada em conta quando calculamos a transmissão de esforços entre a fibra e a matriz (partículas), como é o caso do cálculo do tamanho crítico da fibra (Seção 4.5.3).

A largura do defeito dividido pelo diâmetro da fibra (%) em função da razão de compactação (%) é representada na Figura 61.



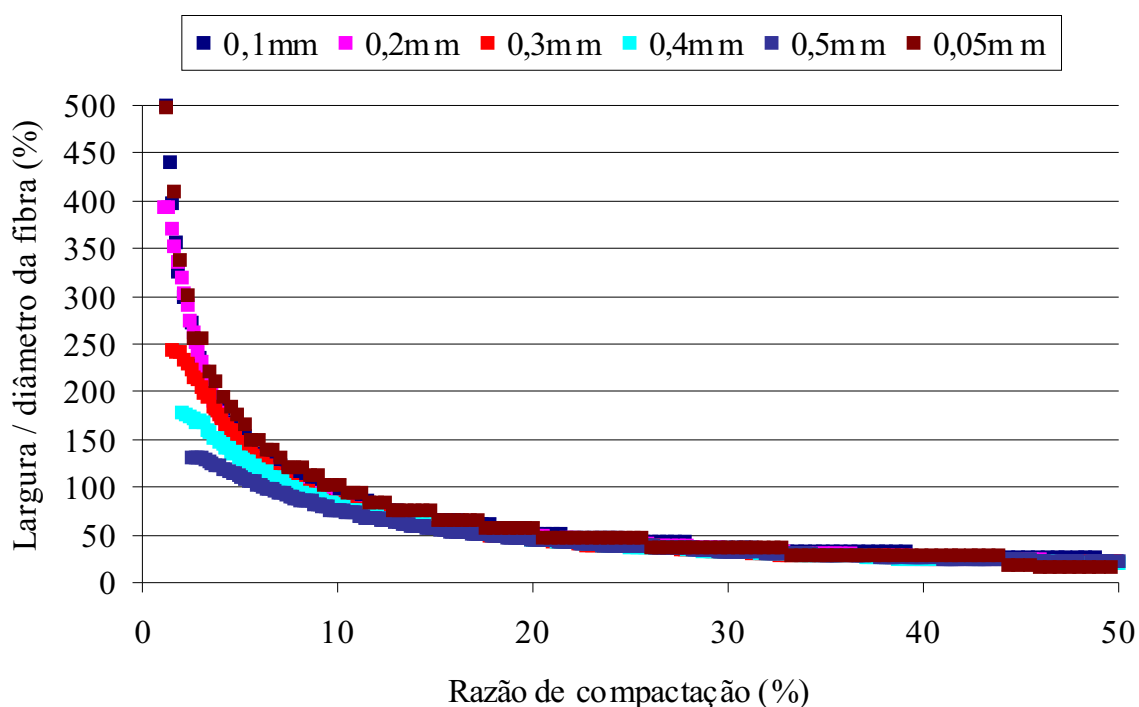


Figura 61: Razão da largura do defeito pelo diâmetro da fibra em função da razão de compactação

Verifica-se a tendência a um valor constante para razão de compactação superior a 30%. Para a razão de compactação igual a 50%, temos um valor próximo de 22% para a relação entre a largura do defeito dividido pelo diâmetro da fibra.

Portanto a largura do defeito é proporcional ao diâmetro das fibras utilizadas na modelagem.

#### 4.5.3 Tamanho crítico da fibra

A fibra utilizada para reforço em compósitos deve ter um tamanho apropriado para transmissão eficiente de esforços entre a matriz e o elemento de reforço.

Existe um tamanho mínimo, chamado de tamanho crítico da fibra, necessário para a efetivo reforço em termos de resistência e rigidez do material compósito (CALLISTER, 1999). O tamanho crítico ( $l_c$ ) é dependente do diâmetro da fibra ( $d$ ) e a resistência última

a tração da fibra( $\sigma_f$ ), e a resistência de aderência da fibra-matriz ( $\tau_c$ ) de acordo com a Equação 14 (CALLISTER, 1999).

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (14)$$

Quando a tensão igual a  $\sigma_f$  é aplicada em uma fibra com comprimento igual ao comprimento crítico, como detalhado na Figura 62(a), a máxima carga sobre a fibra se encontra exatamente no meio da fibra. Quando temos um comprimento de fibra superior ao comprimento crítico, o reforço se torna mais efetivo, pois um comprimento maior da fibra vai estar submetido a carga máxima como mostra a Figura 62(b). Por outro lado, se o comprimento da fibra for inferior ao tamanho crítico, a carga máxima aplicada sobre a fibra vai ser inferior a resistência última a tração da fibra ( $\sigma_f$ ) como mostra a Figura 62(c).

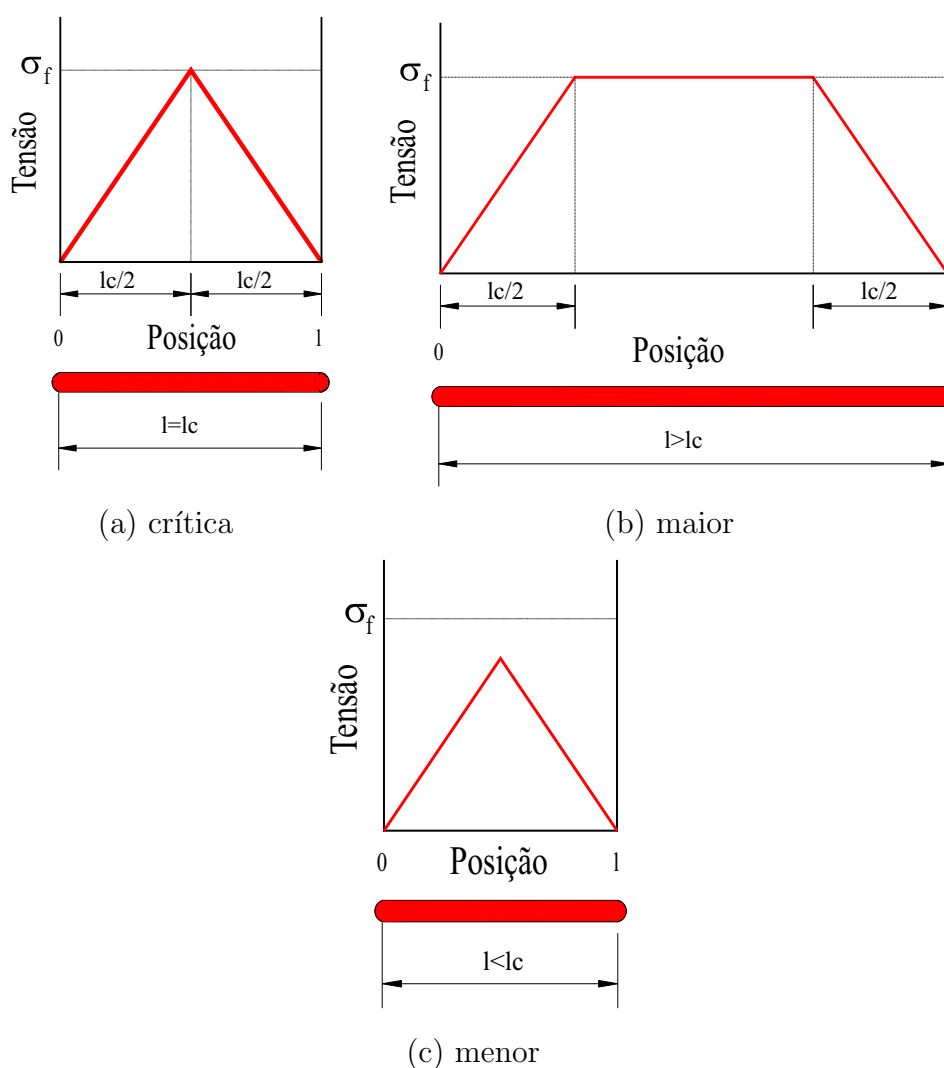


Figura 62: Tensão desenvolvida na fibra segundo o seu tamanho

No caso do compósito lignocelulósico partícula/fibra, podemos impor um coeficiente que considera a zona de não-aderência. Pelos resultados verificados na Figura 60 o coeficiente de correção para o comprimento crítico da fibra deve considerar que a área superficial de contato na interface partícula/fibra fica reduzida em 25% (com segurança para todos as fibras testadas na simulação) para uma razão de compactação em torno de 30%.

Portanto podemos reescrever a equação do comprimento crítico ( $L_c$ ) corrigido (Equação 15).

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \sigma_f = \frac{L_c}{2} \pi \left( \frac{3}{4} d \right) \tau_c$$

$$L_c = \frac{2\sigma_f d}{3\tau_c} \quad (15)$$

#### 4.5.4 Tensões perpendiculares ao plano do compósito

Além do efeito da zona de não-aderência sobre o comportamento da transferência de tensão da matriz para a fibra, ela provoca defeitos no compósito que normalmente não devem afetar as tensões na flexão. Mas por outro lado, afetam a resistência do compósito nas tensões perpendiculares ao plano, ou seja, na resistência a tração perpendicular (ligação interna).

Por outro lado, como a densidade das fibras (sisal e de bananeira) é maior que a densidade das partículas (*Pinus spp*), a razão de compactação diminui com o acréscimo das fibras, portanto a superfície de contato entre as partículas sofrerá um decréscimo (Figura 59) interferindo negativamente na ligação interna.

RICE e CAREY (1978), apud SUO e BOWYER (1995), propuseram uma relação linear entre a razão de compactação e a ligação interna (Equação 10). Como a simulação mostrou (Figura 59), o comportamento do contato entre partículas frente a razão de compactação não é linear.

Com base nisso, a Figura 63 apresenta o resultado da variação do contato entre partículas frente a razão de compactação para a fibra com diâmetro de 0,2 mm, bem como a linha de tendência e a sua equação, simplificada:  $18\text{Ln}(\text{RC}\%)+31$ .

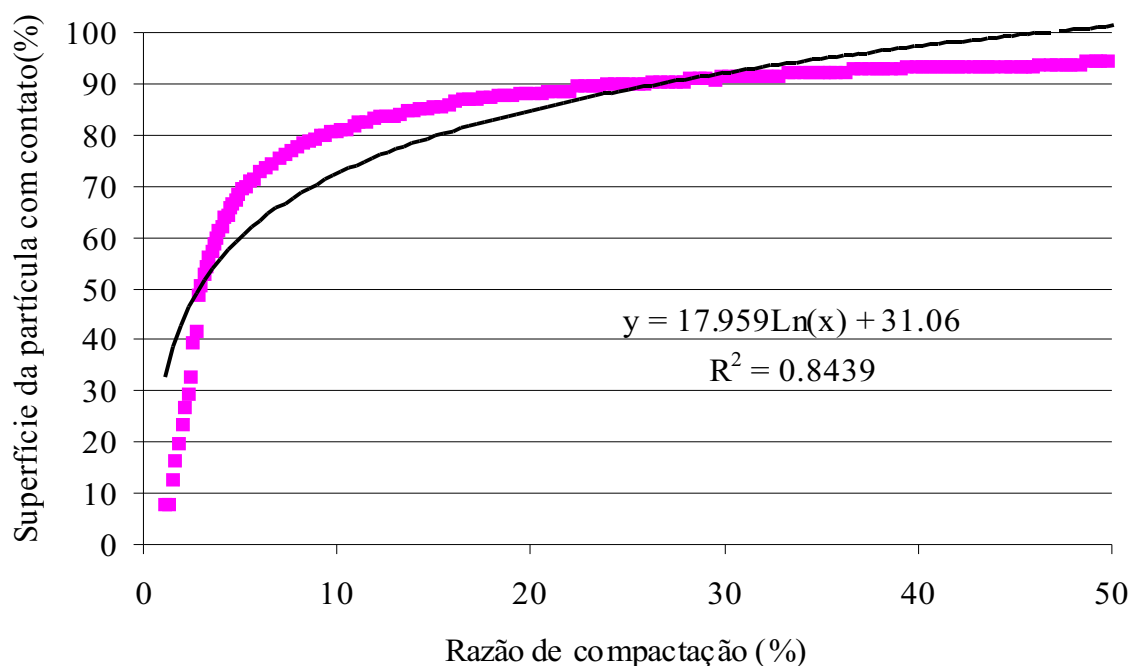


Figura 63: Superfície de contato entre partículas em função da razão de compactação para fibra com 0,2mm de diâmetro, linha e equação de tendência

Fazendo uma correlação direta entre a ligação interna e o contato entre as partículas representado pela razão de compactação, podemos descrever a Equação 16 tomando o valor de 695 kPa para ligação interna com 100% de eficiência, valor obtido na chapa de controle com 100% de partículas grossas:

$$LI = 695(0,18Ln(RC) + 0,31) \quad (16)$$

Onde:

LI = ligação interna (kPa);

RC = razão de compactação (%) (Equação 1).

A Tabela 43 apresenta a variação da ligação interna calculada pela Equação 16 de acordo com a variação da razão de compactação com o acréscimo das fibras de sisal.

Tabela 43: Ligação interna simulada e caracterizada com adição de fibras de sisal

Fibras de sisal %	Densidade das partículas g/cm <sup>3</sup>	RC %	LI simulada kPa	LI caracterizada kPa
5	0,55	36	663	640
10	0,60	25	618	633
20	0,64	16	562	575

A densidade das partículas foi calculada utilizando a densidade da madeira como sendo 0,51 g/cm<sup>3</sup> (*Loblolly pine*, FPL (1999)) e a densidade das fibras de sisal como 1,4 g/cm<sup>3</sup> (WEGST, 1996).

A comparação da ligação interna simulada e a caracterizada (Tabela 43) valida a Equação 16. Isso mostra que não existe uma relação linear entre a ligação interna e a razão de compactação.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A utilização dos recursos naturais de uma maneira eficiente, além de ser uma obrigação é também uma necessidade da sociedade, visto a avançada degradação do meio ambiente.

A madeira por ser um material natural, e um recurso renovável, pode cumprir um grande papel nessa necessidade.

Os resíduos de madeira particulados processados adequadamente podem ser utilizados para a fabricação de chapas aglomeradas como mostra os resultados apresentados.

O princípio norteador da Ciência e Engenharia de Materiais, utilizado aqui para alcançar os objetivos propostos, pode ser visualizado através da Figura 64.



Figura 64: O princípio da Ciência e Engenharia de Materiais aplicado a fabricação de compósitos com resíduo particulado de madeira e fibras vegetais

Quanto ao PROCESSAMENTO, a utilização do procedimento de pós-mistura no enresinamento é fundamental para homogeneização da resina aplicada na superfície das partículas. Além disso, o processo de pós-mistura quebra as partículas, principalmente aquelas danificadas pela operação de usinagem que poderiam comprometer a adesão final

no compósito dado a geometria do cavaco gerado.

A ESTRUTURA modificada com o reforço através de fibras vegetais proporciona melhora considerável da resistência paralela ao plano do compósito, possibilitando até uma diminuição na quantidade de adesivo.

A fabricação do misturador para utilização do procedimento de fricção nas partículas enresinadas durante a Fase 2 foi fundamental, proporcionando melhora significativa da distribuição da resina nas partículas. Com isso, houve uma melhora na adesão das partículas, resultado traduzido no acréscimo relativo da ligação interna em 427% quando comparados os resultados obtidos com a chapa de partículas grossas da Fase 1.

A análise estatística comparativa dos resultados da Fase 2, tomando-se a chapa de controle e aquelas com adição de fibras vegetais comprova que:

- a adição de fibra de sisal aumenta a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade da chapa com partículas grossas bem como o módulo de elasticidade da chapa com partículas finas.
- a adição de fibras de bananeira aumenta a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade tanto para a chapa com partículas grossas quanto para a chapa com partículas finas.
- a adição de fibras de madeira melhora a força de arrancamento de parafusos e reduz o inchamento da espessura da chapa com partículas finas.
- a adição de fibras de sorgo-vassoura melhora a tensão de ruptura, reduz a absorção de água e o inchamento da espessura da chapa com partículas grossas, bem como melhorou a força de arrancamento de parafusos e reduz o inchamento da espessura da chapa com partículas finas.



Os melhores resultados para cada propriedade foram conseguidos através da adição das seguintes fibras:

- a adição da fibra de sisal proporcionou o melhor resultado para a tensão de ruptura na flexão estática na chapa com partículas grossas, o máximo valor foi com o acréscimo de 10% de fibras, quando tivemos um aumento de 33,5% (17,90 MPa), comparando com as chapas de controle (13,41 MPa).
- a adição da fibra de bananeira apresentou o melhor resultado para a tensão de ruptura e módulo de elasticidade para a chapa com partículas finas, com adição de 5 e 10% respectivamente, quando obteve-se um acréscimo de 27,5% (14,13 MPa) e 40,2% (2744 MPa) respectivamente, comparando com as chapas de controle (11,08 MPa e 1957 MPa). Além disso, a adição de fibra de bananeira forneceu o máximo resultado para o módulo de elasticidade da chapa com partículas grossas, com adição de 10%, quando tivemos um acréscimo de 68,3% (3690 MPa), comparado com a chapa de controle (2192 MPa).
- a adição da fibra de sorgo-vassoura proporcionou o melhor resultado do inchamento da espessura após imersão em água por 24 horas, tanto para as chapas com partículas grossas quanto para as chapas com partículas finas. No caso da absorção de água a melhora relativa foi de 21,8% com adição de 15% de fibras, para as chapas com partículas grossas, quando comparadas com as chapas de controle. Para o inchamento da espessura, observou-se os melhores valores com adição de 10% e 5% de fibras, respectivamente para as chapas com partículas grossas e partículas finas, proporcionando uma melhora relativa de 40,9% e 55%, respectivamente, quando comparadas com as chapas de controle.

A simulação mostrou uma relação não linear entre a razão de compactação e a ligação interna. Isto explica a diminuição da resistência perpendicular ao plano do compósito observada com o acréscimo da fibra de sisal em relação a chapa de controle. Porém, esse decréscimo não comprometeu o nível de resistência quando comparados com os requeridos pela norma ANSI A208.1-1993 (Tabela 14).

A fibra de sisal, a fibra da bananeira e a fibra de sorgo-vassoura mostraram-se tecnicamente viáveis. Deve-se limitar a quantidade adicionada a 10% evitando a aglomeração das fibras durante o processamento. A quantidade ideal sem dúvida é próxima de 5%.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES

A partir deste trabalho, existe a possibilidade de novas pesquisas:

- O processo de mistura das partículas com as fibras pode ser realizada com ajuda de ar, objetivando evitar a aglomeração das fibras.
- O enresinamento através de misturadores contínuos, pode ser testada, bastando para isto um adequação no comprimento da zona de pós-mistura, já existente nos misturadores contínuos industriais.
- O reforço com novas fibras vegetais, e mesmo uma mistura de fibras, como, por exemplo, a mistura de fibra de sorgo-vassoura com a fibra de bananeira, mantendo é claro, uma quantidade total próxima de 5% com as fibras sendo cortadas com tamanho próximo de 2cm, evitando a aglomeração.
- O reforço com fibras em chapas feitas com partículas técnicas, pode ser realizada objetivando a diminuição na quantidade de adesivo.

- Além do resíduo particulado de madeira, pode-se utilizar também outros resíduos lignocelulósicos, como, por exemplo, no caso da utilização da fibra da bananeira como reforço, os resíduos do pseudocaule da bananeira produzidos durante o processo de desfibramento.
  
- A fabricação de chapas em multicamadas, com diferentes níveis de reforço com fibras e diferentes níveis de resina, pode ser um grande diferencial. Exemplificando, as fibras de sisal ou de bananeira podem ser dispostas nas camadas externas da chapa proporcionando melhora na resistência a flexão, e na camada interna podemos adicionar fibra de sorgo-vassoura que melhora a resistência a absorção de água e o inchamento da espessura.

## Referências

- ABIMÓVEL. **Panorama bndes**. Disponível em: <[www.abimovel.org.br/panorama.htm](http://www.abimovel.org.br/panorama.htm)>. Acesso em: 4 mar. 2000.
- AGENDA 21. **Conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente e desenvolvimento**. Rio de Janeiro, 1992.
- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials**. In: Annual Book of ASTM Standards, ASTM D 1037. Philadelphia, 1996.
- ARENDS, G. **An overview of possible uses of sawdust**. Amsterdam: TOOL foundation, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10024: Chapa dura de fibras de madeira**. Rio de Janeiro, 1987.
- BISWAS, S. et al. **Development of natural fibre composites in india**. Disponível em: <[www.tifac.org.in](http://www.tifac.org.in)>. Acesso em: 7 ago. 2002.
- BITTENCOURT, E. Por que reciclar? **Jornal Evolução**, São Bento do Sul, 03, 1999.
- BITTENCOURT, E.; ALARCON, O.; FARIAS, M. Chapas aglomeradas a partir de resíduos de madeira reforçadas com fibras vegetais. In **VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, Uberlândia - MG, 2002a.
- BITTENCOURT, E.; ALARCON, O.; FARIAS, M. Processamento de chapas aglomeradas a partir de resíduos de madeira com o uso de um pós-misturador. In **VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**, Uberlândia - MG, 2002b.
- BRITO, E. **Produção de chapas de partículas de madeira a partir de maravalhas de Pinus elliottii Engelm. Var. elliottii plantado no Sul do Brasil**. 1995. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná - Setor de Ciências Agrárias. Curitiba.
- CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering - an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- CAMPBELL, C. Method and novel composition board products. United States Patent 5.847.029. 8 dez. 1998.
- CHRISTENSEN, R. ROBITSCHKEK, P. Resin efficiency and the effect of post-blending in particleboard manufacture. In T. M. MALONEY (Ed.), **Proceedings of VI-II Washington State University Symposium on Particleboard**, Pullmann, Washington, p.185-198, 1975.
- COMERCIAL STANDART. **CS 236-66: Mat formed wood particleboard**.
- ERHARDT, T. et al. **Curso Técnico Têxtil: física e química aplicada, fibras têxteis, tecnologia**. São Paulo: EPU - EDUSP. 1976.
- ERIKSSON, E. Apparatus for making sawdust chipboard. United States Patent 4.035.120. 12 jun. 1977.
- FPL. **Wood handbook: wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture. FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999.

- GHAVAMI, K. Cement composites reinforced with bamboo and vegetable fibers. In **International Conference on Concrete and Development**, Tehran, 2001.
- GROTH, M. **Tronco da bananeira é nova fonte de renda**. Joinville, 2000.
- HOYLE, R. Factors required for establishing structural particleboard design properties. In W. S. University (Ed.), **Proceedings of VII Washington State University Symposium on Particleboard**, Pullmann, Washington, p.401–413, 1973.
- HSU, W. A practical steam pressing technology for wood composites. In W. S. University (Ed.), **Proceedings of XXV Washington State University Symposium on Particleboard**, Pullmann, Washington, p.69–82, 1991.
- IJIRA. **Fibre properties**. Disponível em: <[www.ijira.org/fib-prop.htm](http://www.ijira.org/fib-prop.htm)>. Acesso em: 7 ago. 2002.
- JAGER, R. The new pallmann ring refiner, type pf, for green sawdust, shavings, and other such materials. In T. M. MALONEY (Ed.), **Proceedings of XXVI Washington State University Symposium on Particleboard**, Pullmann, Washington, p.94–105, 1992.
- KELLY, M. Critical literature review of relationships between processing parameters. Technical Report FPL-10, USDA General Technical Report. 1997. 65 p.
- KOLMANN, F.; KUENZI, E.; STAMM, A. **Principles of wood science and technology: wood based materials**, v. 2. Berlin: Springer-Verlag, 1975.
- LANG, E. WOLCOTT, M. A model for viscoelastic consolidation of wood-strand mats-part i-structural characterization of the mat via monte carlo simulation. **Wood and Fiber Science**, v.28, n.1, p.100–109, 1996a.
- LANG, E. WOLCOTT, M. A model for viscoelastic consolidation of wood-strand mats-part ii-static stress-strain behavior of the mat. **Wood and Fiber Science**, v.28, n.3, p.369–379, 1996b.
- LENTH, C. KAMKE, F. Investigations of flakeboard mat consolidation-part ii-modeling mat consolidation using theories of cellular materials. **Wood and Fiber Science**, v.28, n.3, p.309–319, 1996.
- MALONEY, T. **Modern particleboard and fiberboard**. San Francisco: Miller Freeman, 1977.
- MODESTO, Z. SIQUEIRA, N. **Botânica**. São Paulo: E.P.U., 1981.
- MOSLEMI, A. **Particleboard**, v.1 e 2. Illinois: Southern Illinois University Press, 1974.
- NYLUND, S. et al. Foamed adhesive for particleboard. United States Patent 5.324.590. 28 jun. 1994.
- SAVASTANO JR, H. AGOPYAN, H. **Fibras naturais para produção de componentes construtivos**. Disponível em: <[www.usp.br/fzea/cali.html](http://www.usp.br/fzea/cali.html)>. Acesso em: 12 set. 1999.
- SHI, S. GARDNER, D. An evaluation of analysis methods to eliminate the effect of density variation in property comparisons of wood composites. **Wood and Fiber Science**, v.31, n.2, p.164–172, 1999.
- SINDIMÓVEL Relatório de atividades. SINDICATO DAS INDÚSTRIAS MOVELEIRAS DE SÃO BENTO DO SUL, 1999.

- SMITH, L. et al. **Flora Ilustrada Catarinense - I Parte**. Itajaí: Raulino Reitz, 1982.
- SOUZA, A. et al. **Banana - Estudo de Economia e Mercado de Produtos Agrícolas, 2**. Florianópolis: Instituto de Planejamento e Economia Agrícola de Santa Catarina, 1995. 103p.
- STAHL, D.; CRAMER, S.; GEIMER, R. Effects of microstructural heterogeneity in cement excelsior board. **Wood and Fiber Science** v.29, n.4, p.345–352, 1997.
- SUCHSLAND, O. Hygroscopic thickness swelling and related properties of selected comercial particleboards. **Forest Products Journal** v.22, n.11, p.28–32, 1972.
- SUO, S. BOWYER, J. Simulation modeling of particleboard density profile. **Wood and Fiber Science**, v.26, n.3, p.374–411, 1994.
- SUO, S. BOWYER, J. Modeling of strength properties of structural particleboard. **Wood and Fiber Science**, v.27, n.1, p.84–94, 1995.
- TAYLOR, R. **FEAPpv - A Finite Element Analysis Program - Personal Version**. Berkeley, California: University of California at Berkeley, 2001.
- TUD-TNO **Nature fibre composites from upholstery to structural components**. Disponível em: <www.ind.tno.nl> Acesso em: 07 ago. 2002.
- TURNER, H. Effect of particle size and shape on strength and dimensional stability of resin bonded wood-particle panels. **Forest Products Journal**, v.4, n.5, p.210–222, 1954.
- WEGST, U. **The mechanical performance of natural materials**. 1996. Ph. D. thesis, University of Cambridge, Departament of Engineering.
- WILSON, J. KRAHMER, R. The wetting and penetration of phenolic and lignosulfonate resins as possible indicators of bond strength for board. In W. S. University (Ed.), **Proceedings of XII Washington State University Symposium on Particleboard**, Pullmann, Washington, p.305–315, 1978.
- WINISTORFER, P.; YOUNG, T.; WALKER, E. Modeling and comparing vertical density profiles. **Wood and Fiber Science**, v.28, n.1, p.133–141, 1996.
- WOLCOTT, M.; KAMKE, F.; DILLARD, D. Fundamental aspects of wood deformation pertaining to manufacture of wood-based composites. **Wood and Fiber Science**, v.26, n.4, p.496–511, 1994.
- WOLCOTT, M. RIALS, T. In situ cure monitoring of adhesives for wood-based composites. In W. S. University (Ed.), **Proceedings of XXIX Washington State University Symposium on Particleboard**, Pullmann, Washington, p.185–193, 1995.
- XU, W. Influence of vertical density distribution on bending modulus of elasticity of wood composite panels: a theoretical consideration. **Wood and Fiber Science**, v.31, n.3, p.277–282, 1999.
- XU, W. SUCHSLAND, O. Linear expansion of wood composites: a model. **Wood and Fiber Science**, v.19, n.3, p.272–281, 1997.
- XU, W. SUCHSLAND, O. Modulus of elasticity of wood composite panels with a uniform vertical density profile: a model. **Wood and Fiber Science**, v.30, n.3, p.293–300, 1998.

ZIEGLER, R. Review 1980 particleboard literature in no-us journals. **Forest Products Journal**, v.31, n.8, p.55-88, 1981.