5. Resultados e discussão

5.1. Caracterização das fibras

5.1.1. Análises em microscopia eletrônica de varredura

As primeiras análises realizadas nas fibras foram feitas usando o microscópio eletrônico de varredura, dando uma visão das características da superfície das fibras, assim como permitindo analisar a integridade das mesmas após terem sido processadas no triturador elétrico.

Nas imagens referentes às fibras tratadas e não tratadas (figura 20 e 21, respectivamente), pode-se notar que os processos físico químicos de limpeza das fibras, apesar de serem muito eficientes na remoção da umidade excessiva e de parte das impurezas, ainda resultam em fibras dotadas de muito material orgânico em sua superfície, o que pode prejudicar a adesão das mesmas à matriz polimérica.

É possível notar que na fibra que passou pelos processos de tratamento químico, aliado ao processo de cozimento, as partículas de impureza são menos comuns. No entanto, nota-se que as fibrilas, parte constituinte das fibras, ainda encontram-se parcialmente encobertas demonstrando que ainda reside muita matéria orgânica na superfície das fibras, tanto tratadas como não tratadas.

Em alguns casos pode-se notar que o processo mecânico de corte das fibras comprometeu a integridade das fibras (figura 22), contribuindo para a parcial ruptura da parede das mesmas o que compromete a resistência mecânica individual da fibra. No entando seriam necessárias análises estatisticas para avaliar o percentual de fibras danificadas e se isso comprometeria significativamente a resistências das chapas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

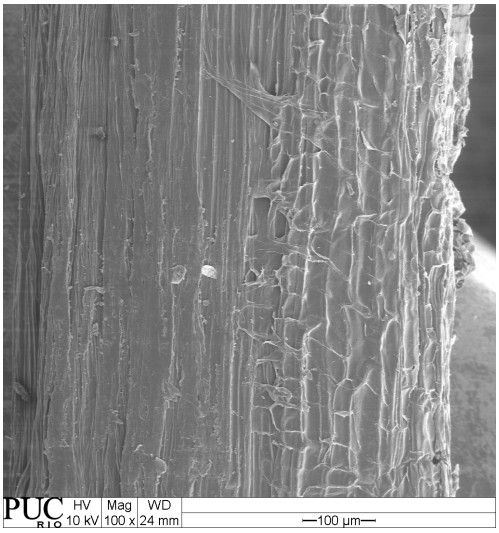

Figura 20 – fibra tratada (MEV)

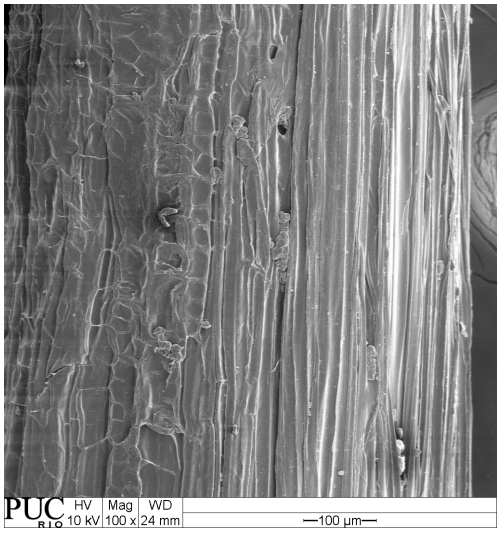

Figura 21 – fibra não tratada (MEV)

Acredito que os ensaios de tração realizados nas fibras possam ser mais eficientes no que diz respeito à aferição do percentual de fibras danificadas e o quanto estes danos podem vir a comprometer a resistência das placas.

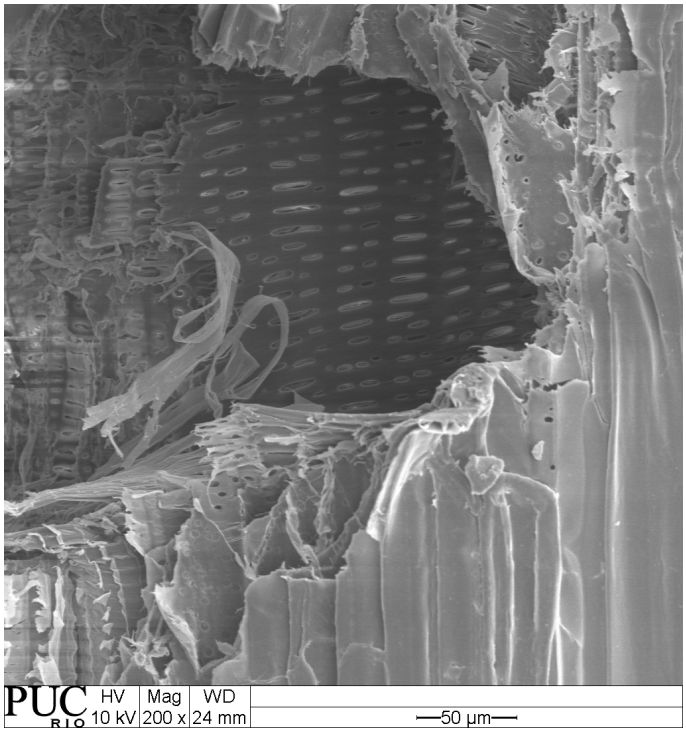

Figura 22 – fibra danificada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

5.1.2. Análises em microscopia ótica digital

As análises em microscopia ótica digital apresentaram uma série de problemas. A preparação dos corpos de prova que tinham como objetivo garantir um processo de análise estatístico e semi-automatizado foi bastante complicada. O principal problema residiu na dificuldade em garantir o alinhamento das fibras e o posicionamento das mesmas de forma perpendicular à superfície a ser analisada.

Apesar das fibras terem sido agrupadas em feixes antes de terem sido embutidas na resina epóxi, o alinhamento das fibras dentro do feixe não foi eficiente, sendo nítida a diferença entre o posicionamento das fibras dentro de um mesmo corpo de prova.

Quanto ao posicionamento do feixe em relação à superfície de análise, a maior dificuldade residiu no fato de que a baixa densidade das fibras e a viscosidade do polímero de embutimento contribuíram para que as fibras flutuassem antes da cura completa da resina epóxi, demonstrando também a ineficiência da tampa com orifício para garantir o posicionamento do feixe. Nota-se que para garantir a eficiência do processo de análise e confiabilidade dos resultados ainda são necessários diversos novos testes afim de garantir, antes de mais nada, a preparação precisa dos corpos de prova.

Vale ressaltar que a diferença de propriedades entre a fibra e a matriz também prejudicou a preparação e o polimento da superfície de análise, que apresentava ora uma série de arranhões e bolhas, ora danos à estrutura da fibra.

De toda forma foi possível obter algumas imagens individuais das fibras. (figura 23). É sabido que para garantir uma maior quantidade de fibras analisadas em uma única imagem é possível utilizar o método de captura de imagens em mosaicos. No entanto a qualidade dos corpos de prova e, por consequência, das imagens obtidas, ficaram muito aquém do desejado, o que não justificaria a captura e o processamento das referidas imagens.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

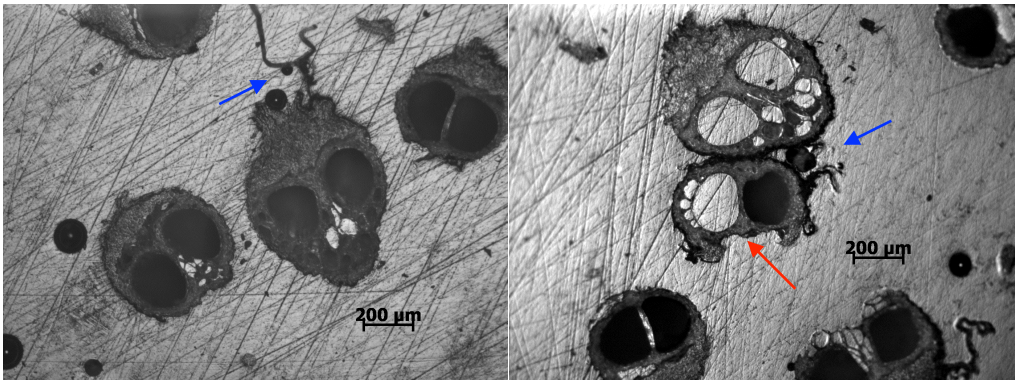

Figura 23– seção transversal das fibras

Apesar do processamento e da análise estatística das imagens não terem sido realizados conforme os objetivos iniciais deste trabalho, as imagens obtidas já serviram para analisar a macroestrutura das fibras e algumas consequências dos processos aplicados às mesmas.

Nota-se que as fibras são compostas por uma camada externa de fibrilas alinhadas que circundam e protegem dois canais destinados para o transporte de seiva e nutrientes dentro da palmeira. Estes canais além de serem essenciais para a manutenção da vida das espécies vegetais, constituem boa parte da área da seção transversal das fibras analisadas, o que contribui para o grande percentual de vazios na macroestrutura e para a baixa densidade das mesmas, também muito comum na quase totalidade das fibras vegetais.

Nas imagens acima é possível notar a presença de impurezas agregadas à superfície das fibras (→) assim como a ocorrência de danos à sua estrutura, similares aos encontradas na análise superficial feita através do processo de microscopia eletrônica de varredura, ou seja, o rompimento da parede de Fibrilas (→), resultante dos processos mecânicos de beneficiamento das mesmas.

Como não foi priorizada a captura de imagens em mosaicos e tampouco a realização do processamento digital das imagens obtidas, que resultaria em dados mínimamente estatíscos da real área da seção transversal das fibras, a aferição da área foi feita de acordo com práticas atualmente utilizadas. Ou seja, presumindo que a seção transversal das fibras é circular, foi utilizado um micrômetro para

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

estimar o diâmetro das fibras e posteriormente calcular a área das mesmas.

É fundamental ressaltar que os dados obtidos a partir do diâmetro encontrado no micrômetro são aproximações. Fatores como irregularidade na forma das fibras, esmagamento causado pelo equipamento de aferição e até mesmo o grande percentual de vazios que constitui as fibras de pupunha, percebidos nas imagens de microscopia, influenciam diretamente a efetiva área da seção transversal.

De toda forma após analisar 80 fibras, o diâmetro médio encontrado foi de 0,35 +/- 0,15mm, e área circular estimada em 0,10 +/- 0,04 mm2.

5.1.3. Ensaio de tração em fibras e análise da densidade

Mesmo não sendo possível realizar uma análise estatística da seção tranversal das fibras, a aferição do diâmetro das mesmas foi feita previamente à preparação dos corpos de prova e do ensaio de tração em si, garantindo relativa normalização das tensões encontradas no referido ensaio.

Nesse momento, foi possível observar que o diâmetro encontrado para as fibras não teve diferença significativa dentre as fibras oriundas das diferentes máquinas, sendo 0,355 mm para as fibras oriundas da moenda e 0, 350 mm para as fibras oriundas da picadeira, indicando que a possível deformação das fibras causada pelas diferentes máquinas é similar, devido ao fato que ambas trabalham com tambores metálicos paralelos como mecanismo de avanço.

Tendo em mãos os dados referentes à área da seção tranversal das fibras obtidos a partir do micrômetro, feixes contendo 10 fibras com comprimento de 10cm cada, totalizando 1 metro, foram pesados fazendo uso de uma balança com precisão de 0,01g para estimar a densidade aparente média das fibras.

Apesar da totalidade das fibras utilizadas para a produção das chapas ter sido processada no triturador elétrico os ensaios de tração foram realizados tanto

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

em fibras oriundas do triturador, quanto em fibras oriundas da moenda, que teóricamente apresentariam menos danos estruturais.

Foram ensaiadas 40 fibras oriundas de cada uma das máquinas supracitadas, a densidade, tensão de ruptura, alongamento percentual e módulo de Young foram calculados (Tabela 2), a fim de comparar as fibras de pupunha aos dados encontrados na bibliografia para as fibras vegetais ou sintéticas comumente utilizadas (Tabela 3).

Tabela 2- Dados referentes às fibras de pupunha oriundas de cada máquina

	Densidade (g/cm3)	Alongamento (%)	Tensão na Ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Fibra Moenda	1,14 +/- 0,26	1,5 +/- 0,4	261,9 +/- 122,2	19,68 +/- 6,6
Fibra Picadeira	1,14 +/- 0,26	2,2 +/- 0,8	238,9 +/- 162,1	11,76 +/- 4,33

Observa-se relativa variação nos resultados para as fibras oriundas das diferentes máquinas de processamento. Conforme esperado, as fibras oriundas da picadeira apresentam piores resultados com relação à resistência à tração e módulo de Young, apresentando não só valores médios menores, como desvio-padrão significativamente maior indicando a maior presença de fibras danificadas. De toda forma os grandes valores encontrados para os desvios-padrão geram sobreposição de resultados. (Dados referentes às fibras ensaiadas Anexos A e B)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

Tabela 3 – Propriedades de fibras vegetais e sintéticas (Marinelli et al. 2005)

Fibra	Densidade (g/cm^3)	Alongamento (%)	Tensão na ruptura (MPa)	Modulo de Young (GPa)
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Rami	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22
Fibra de côco	1,2	3,0	175	4,0-6,0
Vidro-E	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Vidro-S	2,5	2,8	4750	86,0
Aramida (normal)	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbono (padrão)	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0
Curauá	1,4	4,2	890-4.200	50,4

Ao comparar os dados da fibra de Pupunha aos dados de referência, nota-se a priori que o grande percentual de vazios que constituem a estrutura das fibras de pupunha pode ter contribuído para que esta seja a fibra de menor densidade dentre as fibras contempladas na tabela 3.

A fibra de Pupunha apresentou valores menores de tensão de ruptura do que a totalidade das fibras comerciais cultivadas. No entanto, se considerarmos a relação peso/ resistência, a baixa densidade encontrada para as fibras de pupunha se mostra bastante favorável. Vale ressaltar que os resultados encontrados foram superiores aos encontrados para a fibra de Côco, fibra residual que já foi objeto de uma série de estudos e inclusive já é utilizada na confecção de peças de acabamento do interior de alguns modelos de caminhões da Mercedez-Benz (Gayer, U. e Schuh, T. , 1996).

Com relação ao alongamento na ruptura, as fibras de pupunha apresentaram valores similares à Juta e ao Sisal, fibras não muito elásticas. Essa característica, aliada aos valores elevados de módulo de young encontrados para as fibras de Pupunha, apontam positivamente para o uso das fibras como reforço da matriz poliuretana, contribuindo para a redução significativa da deformação de ruptura da matriz e aumento do módulo de Young do compósito em questão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

5.2. Caracterização das chapas de fibra

5.2.1.Ensaios de flexão comparativos

A primeira leva de prensagens foi fundamental para estudar as variáveis do processo proposto, as limitações do maquinário disponível e algumas propriedades das matrizes utilizadas.

Vale ressaltar que das 10 composições inicialmente propostas, algumas delas foram eliminadas. A prensa de 15 toneladas não foi capaz de fechar a forma de 510 x 510 mm para as placas de densidade nominal de 800 kg/m^3 com proporções de fibra/resina maiores que 60/40, resultando em placas de espessura irregular e maior que os 10 mm almejados; além disso, a placa produzida com matriz de dextrina de milho também foi descartada, tendo em vista que após 18 horas de prensagem o adesivo ainda não estava curado por completo. Dessa forma o uso da dextrina de milho para a produção das chapas pelo processo atualmente utilizado, prensagem a frio, mostrou-se inviável, mesmo que em escala reduzida.

Sendo assim, não foi possível realizar os ensaios para as placas de maior densidade com proporções fibra/matriz superiores a 60/40, nem para a placa produzida com matriz de dextrina de milho. Apesar do maior custo da resina poliuretana, a garantia de cura a temperatura ambiente em aproximadamente 5 horas e a resistência à umidade foram determinantes para que a matriz utilizada neste trabalho fosse exclusivamente a resina poliuretana de base vegetal.

A primeira leva de chapas a serem ensaiadas teve como objetivo determinar qual seria a melhor composição, para as diferentes densidades, a serem produzidas. Nesse momento, as 8 composições, que inicialmente se mostraram aptas a serem produzidas, foram ensaiadas a fim de compará-las no quesito

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

resistência à flexão e módulo de elasticidade. Tendo em vista que a proposta de uso dessas placas é em ambientes internos a questão da resistência a umidade e absorção de água não foi relevada nesse momento.

Na primeira leva de ensaios realizados de acordo com a norma americana ASTM D-1037- 06A as chapas com diferentes composições apresentaram propriedades mecânicas bastante distintas. Conforme esperado, as diferenças mais significativas foram observadas quando se tratou de placas com densidades diferentes, mas não se pode desconsiderar o fato de que o aumento na proporção de fibras na formação do colchão também foi determinante para a melhoria do desempenho das referidas placas.

Além dos objetivos principais deste ensaio, que eram a experimentação do processo e dos materiais propostos, e a obtenção de uma de uma base de dados comparativa que pudesse determinar a melhor composição dos painéis; estes dados foram comparados com os parâmetros determinados na norma americana ANSI A208.1-1999 para chapas de partículas, a fim de atestar se as placas resultantes da primeira leva de prensagens apresentavam resistência à flexão e módulo de elasticidade compatíveis com a classe de materiais em que se enquadram.

Os valores encontradados para tensão de ruptura e módulo de elasticidade das placas produzidas na primeira leva de prensagens estão expressos na tabela 4, abaixo:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

Tabela 4 – Dados do ensaio de flexão comparativo (ASTM D1037 -06 A)

	Composição das placas	Tensão de ruptura (N/mm2)	Módulo de elasticidade (N/mm2)
I	Média densidade 60/40 Fibra sem tratamento	12,67 +/- 2,77	660,11 +/- 121,25
III	Média densidade 55/45 Fibras em tratamento	10,75 +/- 1,04	468,59 +/- 50,17
V	Média densidade 50/50 Fibras em tratamento	9,88 +/- 2,0	560,57 +/- 31,86
VIII	Baixa densidade 70/30	8,26 +/- 1,29	605,29 +/- 68,42
IV	Baixa densidade 60/40 fibra tratada	4,21 +/- 0, 38	182,81+/- 7,31
II	Baixa densidade 60/40 fibra s/ tratamento	6,24 +/- 0,69	313,41 +/- 62,85
VI	Baixa densidade 50/50 fibra s/ tratamento	3,44 +/- 0,35	139,62 +/- 28,04
VII	Baixa densidade 50/50 fibra tratada	3,17 +/- 0,49	139,01 +/- 25,78

A norma americana determina diferentes requisitos de acordo com a densidade dos painéis e os usos a que se destinam. Dentre os requisitos estão tolerâncias referentes à regularidade dimensional, dureza, adesão interna, arrancamento de parafusos e emissão de formaldeído. No entanto, nesse momento os requisitos verificados nas placas foram somente tensão de ruptura e módulo de elasticidade.

A Tabela 5 abaixo representa os requisitos para chapas de partículas explicitados na referida norma.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

Tabela 5 – Tabela de requisitos para chapas de partículas (ANSI A208.1-1999, p.9)

Grade[3]	Dimensional Tolerances				
		Thickness Tolerance[5]			
	Length & Width mm (inch)	Panel Average from Specified mm (inch)	Variance from Panel Average mm (inch)	Modulus of Rupture N/mm^2 (psi)	Modulus of Elasticity N/mm^2 (psi)
H-1	±2.0 (0.080)	±0.200 (0.008)	±0.100 (0.004)	16.5 (2393)	2400 (348100)
H-2	±2.0 (0.080)	±0.200 (0.008)	±0.100 (0.004)	20.5 (2973)	2400 (348100)
H-3	±2.0 (0.080)	±0.200 (0.008)	±0.100 (0.004)	23.5 (3408)	2750 (398900)
M-1	±2.0 (0.080)	±0.250 (0.010)	±0.125 (0.005)	11.0 (1595)	1725 (250200)
M-S	±2.0 (0.080)	±0.250 (0.010)	±0.125 (0.005)	12.5 (1813)	1900 (275600)
M-2	±2.0 (0.080)	±0.200 (0.008)	±0.100 (0.004)	14.5 (2103)	2250 (326300)
M-3	±2.0 (0.080)	±0.200 (0.008)	±0.100 (0.004)	16.5 (2393)	2750 (398900)
LD-1	±2.0 (0.080)	+0.125 (0.005) -0.375 (0.015)	±0.125 (0.005)	3.0 (435)	550 (79800)
LD-2	±2.0 (0.080)	+0.125 (0.005) -0.375 (0.015)	±0.125 (0.005)	5.0 (725)	1025 (148700)

Nota-se que mesmo dentro de uma mesma faixa de densidade, representadas por H – alta densidade, M - média densidade e LD – baixa densidade, existem subtipos que determinam os usos a que essas placam se destinam, que resultam em requisitos distintos dentro da mesma faixa de densidade(tabela 6).

Tabela 6 – Subtipos e usos recomendados para as chapas de partículas com diferentes densidades (ANSI A208.1-1999, p.11)

General use and grades

Use	Grade
Commercial	M-1, M-S
Industrial	M-2, M-3
High density industrial	H-1, H-2, H-3
Door core	LD-1, LD-2

Os resultados de tensão de ruptura obtidos para as placas ensaiadas nessa primeira leva foram surpreendentes: nota-se que a placa de média densidade com composição de 60/40 superou, na média, os requisitos apresentados para as placas destinadas para uso comercial, apresentando tensão de ruptura de 12,67 N/mm2,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

acima dos 11,0 e 12,5 N/mm2, referentes aos sub-tipos M-1 e M-S, respectivamente.

Vale ressaltar que apesar do desvio-padrão calculado ser de +/- 2,77, apenas um dos cinco corpos de prova ensaiados apresentou tensão de ruptura inferior à exigida pela norma, com o valor de 10,92 N/mm2.

É interessante ressaltar também, que a chapa de média densidade com composição 55/45 apresentou resultados muito próximos do limite estabelecido para as chapas do sub-tipo M-1, apresentando tensão de ruptura média de 10,75N/mm2. No entanto, ao contrário da chapa com composição de 60/40, somente um dos cinco corpos de prova ensaiados atendeu às exigências da norma nesse quesito.

Os resultados obtidos a partir das chapas de baixa densidade foram ainda mais surpreendentes, já que todas as composições ensaiadas superaram os requisitos de ao menos um dos subtipos especificados na norma, sendo que as placas com composição de 70/30 e 60/40, produzidas com fibra não tratada, supereram os requisitos para ambos os subtipos LD-1 e LD-2, indicados para uso como isolante e enchimento de portas.

Apesar dos excelentes resultados obtidos para tensão de ruptura, os valores obtidos para o módulo de elasticidade foram muito inferiores aos determinados na referida norma. Em todos os casos, mesmo superando a tensão de ruptura mínima exigida, os módulos de elasticidade encontrados foram bastante inferiores aos explicitados na norma.

Nota-se que, mesmo apresentando valores muito inferiores aos determinados pela norma, as chapas produzidas com maior proporção de fibras em sua composição apresentaram módulos de elasticidade muito superiores às demais, coerente com os excelentes resultados encontrados para o módulo de Young da fibras. Estes fatos nos levam a concluir que os resultados insatisfatórios referentes ao módulo de elasticidade das placas estão diretamente ligados às características da matriz poliuretana utilizada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

A resina utilizada apresenta, de acordo com o fabricante, módulo de deformação de 1,8 MPa até 2,2 MPa, equivalentes a 1,8 N/mm2 e 2,2 N/mm2, respectivamente, e alongamento de ruptura de até 50% ; propriedades bastante distintas do polímero comumente utilizado, o formaldeído, que é um polímero que após sua cura total apresenta aspecto vitreo, muito menos ductil que a resina poliuretana utilizada.

De toda forma os ensaios comparativos serviram para aferir que os melhores resultados obtidos para as chapas de média densidade foram os referentes à chapa com composição de 60/40 e para as chapas de baixa densidade os melhores resultados obtidos foram referentes à chapa com composição 70/30.

Vale ressaltar que as placas produzidas a partir de fibras tratadas apresentaram valores de tensão de ruptura e módulo de elasticidade ora similares, ora inferiores aos obtidos a partir das placas produzidas com fibras não tratadas, o que indica que o tratamento físico-químico inicialmente aplicado às fibras não leva a uma melhoria nas propriedades mecânicas das chapas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

5.2.2. Ensaios de flexão de acordo com a norma ABNT para MDF

Dentre as 4 placas de cada densidade produzidas para os ensaios, duas se mostaram, apesar de visualmente similares, nitidamente mais flexíveis e menos resistentes que as demais, indicando menor quantidade de fibras em sua composição. Apesar das prensagens terem sido feitas de acordo com os parâmetros pre-determinados, proporções mássicas pré-definidas, as fibras utilizadas não foram processadas no mesmo momento; assim, percebe-se que o processo artesanal de beneficiamento das fibras ainda resulta em fibras com propriedades ou características distintas.

Supõe-se que a principal razão para a disparidade nas propriedades das placas tenha sido a diferença no teor de umidade presente nas fibras, o que contribui para que as placas, mesmo apresentando densidades e proporções mássicas similares, tenham em sua composição quantidades diferentes de fibra.

Sendo assim, as duas placas aparentemente menos resistentes foram descartadas, e para os ensaios foram utilizadas apenas as placas que se mostraram mais similares, em termos de comportamento mecânico, às primeiras chapas produzidas.

Os resultados obtidos para tensão de ruptura e módulo de elasticidade para as chapas de fibra de pupunha com P.U. vegetal de média e baixa densidade, assim como para a chapa de MDF produzida e comercializada pela Masisa, estão expressos na tabela 7.

A norma ABNT 15316 - 2:2009 apresenta classificações e requisitos diferentes dos encontrados na norma ANSI A208.1-1999. As placas consideradas na norma americana como de média densidade, na norma brasileira são classificadas com *Standard* (650-800 kg/m3), ao passo que as de baixa densidade são consideradas chapas *Light* (550-650 kg/m3). Na referida norma também se faz menção às chapas *Ultra-Light* (450-550 kg/m3) e para uso como revestimento de forros e paredes (Tabela 8).

Tabela 7 – Dados referentes ao ensaio de flexão (ABNT 15316 - 3:2009)

	Tensão de Ruptura (N/mm2)	Módulo de elasticidade (N/mm2)
Standard 60/40	6,46 +/- 4,07	420,66 +/- 157,71
Light 70/30	3,54 +/- 0,95	401,58 +/- 135,32
Mdf Standard - Referência	15,94 +/- 4,03	1988,29 +/- 370,1

A priori pode–se notar que as placas ensaiadas nessa leva apresentaram valores muito inferiores aos encontrados na primeira batelada de ensaios, consequência direta da utilização de mão-de-obra local, em processo de capacitação, para a confecção das placas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

Nota-se também que os resultados encontrados em ambas as levas se mostraram abaixo dos obtidos para o MDF de referência, apesar dos resultados obtidos na primeira leva terem sido significativamente mais próximos. De qualquer forma em nenhum dos ensaios, os resultados superaram os requisitos para as chapas de uso geral, ficando abaixo também dos requisitos para as chapas de revestimento na referida norma brasileira.

Tabela 8 – Requisitos ABNT 15316 - 2:2009

	Tensão de Ruptura (N/mm2)	Módulo de elasticidade (N/mm2)
Standard – uso geral – condições secas	23	2700
Light – uso geral – condições secas	18	1600
Ultra- Light – Uso geral- Condições secas	7,7	600
Chapas para revestimentos	14	1600

Vale ressaltar que o próprio MDF de referência, com densidade de aproximadamente 760 kg/m3, atualmente comercializado e produzido industrialmente, também não atendeu aos requisitos de tensão de ruptura para as chapas *Standard*, já que nenhum dos corpos de prova ensaiados apresentou tensão de ruptura acima de 19 N/mm2. Os resultados obtidos para o MDF também não atenderam aos requisitos para as chapas *Light*, de densidade muito inferior àquela aferida para o MDF ensaiado, já que apenas um dos corpos de prova apresentou tensão de ruptura acima dos 18 N/mm2 exigidos.

De qualquer forma, esses resultados não invalidam os resultados obtidos na primeira batelada de ensaios, que comprovaram a viabilidade de produção das chapas de acordo com a norma ANSI A208.1-1999. Apesar da variância dos resultados, que ressalta a necessidade de melhores e mais constantes visitas visando a capacitação dos funcionários, os resultados foram bastante satisfatórios.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

As placas ensaiadas na segunda batelada de testes foram confeccionadas integralmente pelos atuais trabalhadores da fazenda que, apesar de terem sido instruídos para a confecção das mesmas, ainda não têm a experiência necessária para garantir a regularidade das prensagens. Os resultados inferiores e com maiores desvios-padrão eram esperados. A maior dispersão de resultados é nítida se compararmos os gráficos de tensão X deformação para a mesma composição nas diferentes bateladas de ensaio (Figuras 24 e 25).

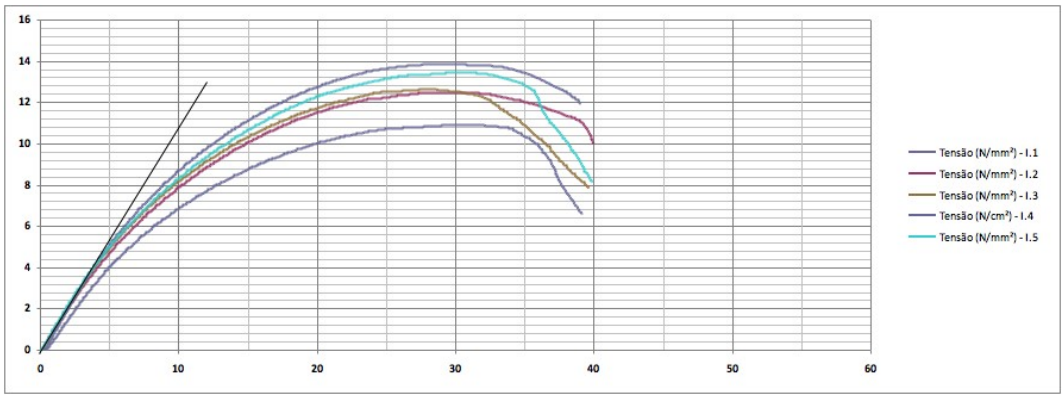

Figura 24 – Tensão x deformação: Chapa média densidade 60/40

Percebe-se uma regularidade muito maior nos resultados obtidos na primeira batelada, tanto na tensão de ruptura, quanto no módulo de elasticidade. É necessário reiterar que as placas ensaiadas na primeira batelada foram produzidas com o objetivo de comprovar a viabilidade de confecção das mesmas, sendo assim, foram produzidas com preciosismo compatível ao de uma produção em escala laboratorial, ao passo que as placas ensaiadas na segunda batelada são resultantes de prensagens feitas em escala piloto, visando a implementação de uma escala de produção comercial, que nitidamente ainda requer melhor capacitação da mão-de-obra para ser implementada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

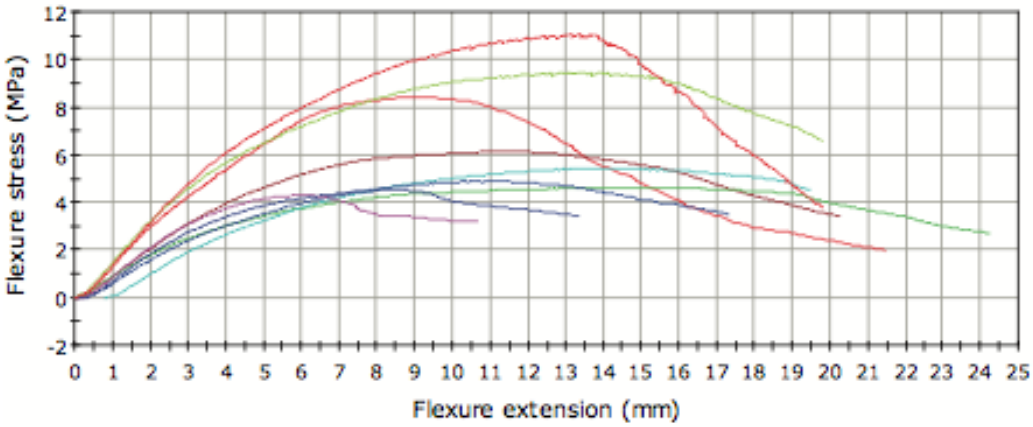

Figura 25 – Tensão x deformação: Chapa média densidade 60/40 – segunda batelada de ensaios

(Ensaio completo para diferentes composições Anexos C e D)

Apesar dos valores absolutos encontrados para as chapas objeto deste trabalho terem sido inferiores aos encontrados para o MDF atualmente comercializado, as diferenças entre o comportamento mecânico das chapas artesanais e o comportamento do MDF apontam para algumas vantagens das chapas de fibras de pupunha com resina poliuretana. Ao analisarmos o gráfico de tensão X deformação obtido para o MDF (figura 26), podemos notar que a ruptura se dá de maneira brusca, ou seja, ao atingir a tensão limite a chapa rompe de maneira abrupta. Característica bastante indesejável para materiais possivelmente utilizados para a confecção de mobiliário entre outras aplicações estruturais.

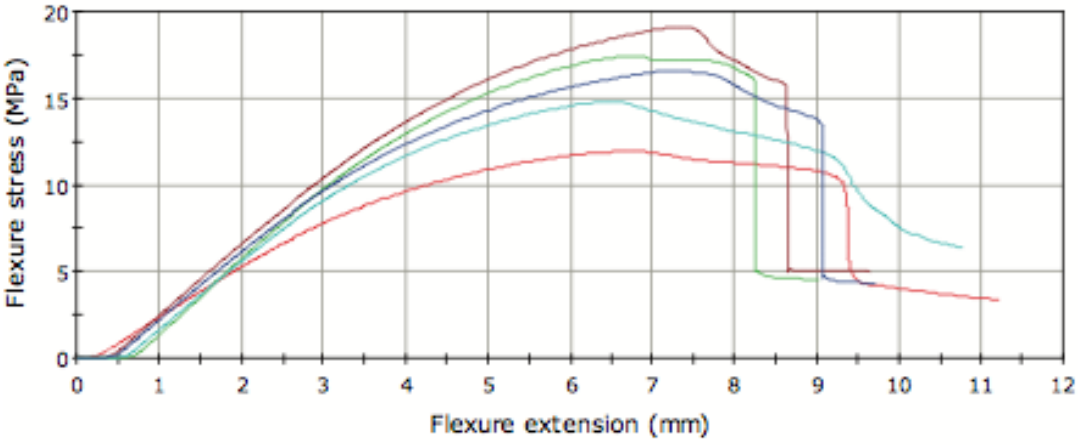

Figura 26 –Gráfico Tensão X Deformação MDF 6mm – produzido pela MASISA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

(Ensaio completo no Anexo E)

Se observarmos o ponto de ruptura para as chapas produzidas com fibras de Pupunha, a ruptura se dá de maneira controlada, sendo que foram poucos os casos onde os corpos de prova romperam por completo. Dessa forma, o maior comprimento das fibras utilizadas na confecção das chapas artesanais contribuiu para uma ruptura mais ductil, apresentando deformação significativa antes da integridade das placas ser comprometida.

É incontestável o fato de que um processo produtivo mecanizado e industrial proporciona propriedades e caracteríscas mais regulares às chapas resultantes, assim como custos mais baixos de produção. No entanto, a proposta de valorização da mão-do-obra humana, geração de trabalho e renda para as comunidades rurais assim como o adensamento da cadeia produtiva trazem diversos benefícios sócio-ambientais inalcançáveis pelos processos tradicionalmente utilizados pela indústria.

Dessa forma, por mais que as placas desenvolvidas neste trabalho não tenham plenamente atendido às exigências da norma nacional para MDF, uma abordagem voltada para o design de produtos propicia a aplicação destas chapas em produtos voltados para o ramo de arquitetura e decoração com maior valor agregado do que a venda do material em si (figura 27), proporcionando assim, maior viabilidade comercial do material em questão.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

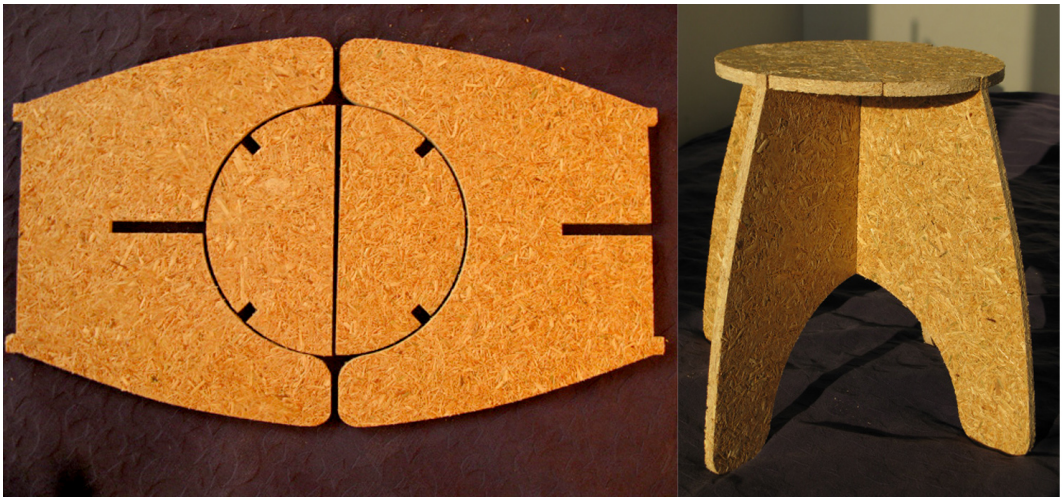

Figura 27 – banco produzido a partir da chapa de fibras de Pupunha

5.2.3. Análise da regularidade dimensional, densidade e inchamento percentual

Para aferir a regularidade dimensional, a espessura dos corpos de prova de 50 X 50 mm foi aferida nas quatro extremidades. Foram raros os casos onde a espessura encontrada nas quatro extremidades foi igual. Variações de até 0,3 mm são constants; no entanto, acredito que essa variação esteja relacionada à irregularidade da superfície, que é composta por diversas fibras de tamanho considerável, que dificilmente se acomodam ao ponto de formar uma superfície lisa. O processo semi artesanal proposto faz uso de uma prensa hidráulica de 15 toneladas, que proporciona uma pressão de apenas 0,58 Pa.

De toda forma, as placas de densidades e composições diferentes apresentaram também diferentes espessuras aparentes entre si, ambas significativamente acima dos 6mm almejados. A espessura média encontrada para a chapa *Standard* 60/40 foi 7,17 +/- 0,6mm, e para a chapa *Light* 6,51 mm +/- 0,5mm. as variações encontradas nas placas também foram acima das toleradas na norma ABNT NBR 15316-2: 2009, que apresenta limite de variação de espessura de apenas 0,2mm. É importante frisar que o MDF testado apresentou variações de espessura de até 0,5mm.

A grande diferença entre a espessura desejada de 6mm e as espessuras aferidas pode ter sido causada por imprecisões nas formas que, após repetidas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

prensagens, começam a reter partículas ocasionando desníveis nas mesmas, tanto na superfície de prensagem, quanto nos batentes que determinam o vão livre a ser preenchido pelas fibras.

Essa diferença acabou ocasionando uma diferença entre a densidade almejada e a densidade percebida. As placas *Standard* com densidade almejada de 800 kg/m3 apresentaram densidade percebida de 690 +/- 80 kg/m3, ao passo que as chapas *Light* apresentaram densidade aparente de 480 +/- 80 kg/m3 (Anexo F), que na realidade enquadram as chapas na classificação de chapa *Ultra-Light*, com requisitos abaixo das chapas *Light*, porém ainda acima dos valores encontrados para as chapas produzidas neste trabalho.

Com relação ao ensaio de imersão, a propriedade impermeabilizante da matriz poliuretana foi fundamental para a garantia dos excelentes resultados. As chapas *Standard*, que possuiam maior quantidade de resina, proporção mássica de 60/40, apresentaram inchamento percentual médio de 9,8%, ao passo que as chapas *Ultra-Light,* com fração mássica de resina de apenas 30%, apresentaram inchamento percentual de 13,9% (Anexo G). Esses valores são bastante inferiores aos requisitos para os MDF de uso geral e estrural, inclusive para o MDF a ser utilizado em condições úmidas, que apresentava como requisito o inchamento máximo de 18%.

No entanto, a exigência para uso como revestimento de forros e paredes era mais rígida, com inchamento máximo tolerável de 10%, indicando que somente as placas com maior fração mássica de resina seriam próprias para esse fim. É importante ressaltar que as exigências com relação ao inchamento percentual máximo tolerado na norma da ABNT são inversamente proporcionais à espessura, ou seja, quanto mais espessas as chapas menores são os valores de inchamento percentual tolerados. Sendo assim, os requisitos para os revestimentos supracitados teóricamente não se aplicam às chapas ensaiadas, tendo em vista que as espessuras determinadas nesta seção são entre 10 e 12 mm, praticamente o dobro das chapas ensaiadas, que apresentavam espessuras entre 6 e 7,75mm.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA

Uma das razões para a escolha resina poliuretana foi exatamente sua propriedade impermeabilizante, característica fundamental para garantir a proteção das fibras, em geral sem nenhum tratamento, do ataque de microorganismos. Por meio do ensaio de imersão por 24 horas, foi possível comprovar que, mesmo com resistência mecânica inferior aos adesivos comumente utilizados pela indústria, a matriz poliuretana é um excelente impermeabilizante conferindo as chapas produzidas baixas taxas de inchamento percentual, sugerindo inclusive que aplicações em áreas externas seriam possíveis.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821581/CA