

4 Resultados e Discussão

4.1 Caracterização da fibra de ubuçu

4.1.1 MEV/EDS

As Figuras 56A e 56B ilustram o aspecto geral das fibras de ubuçu nas faces interna e externa, respectivamente. É possível observar que as fibras apresentam uma direção preferencial, que corresponde ao sentido do comprimento do saco que contém os frutos de ubuçu. Pode-se observar, ainda, que na face externa (Figura 56A), as fibras são mais visíveis, enquanto na parte interna (Figura 56B), existe um material orgânico cobrindo as fibras.

Em ambas as regiões, porém, observa-se que as fibras estão unidas entre si e têm uma direção preferencial. Essa diferença de aspecto pode ser devida ao processo de lavagem realizado pelos ribeirinhos, que aparentemente, não é eficiente o suficiente para remover o resíduo orgânico da parte interna do saco de fibras.

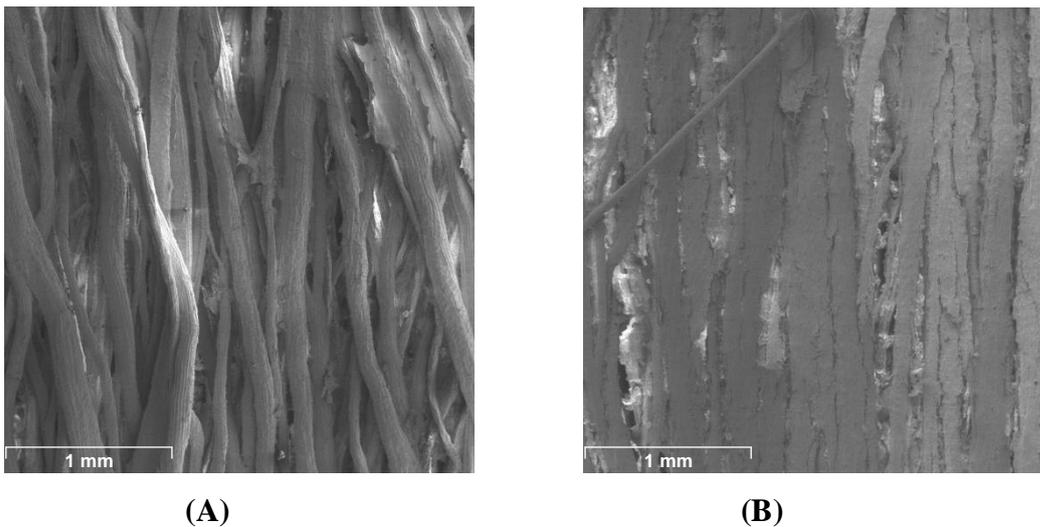


Figura 56 – Face externa da fibra (A) e face interna (B)

Os aspectos superficiais das fibras nas regiões interna e externa estão mostrados em maior detalhe nas Figuras 57A e 57B. Pode-se observar na Figura 57A, referente à região externa, a presença de células parenquimáticas, características à superfície de fibras vegetais, fato também observado por MARTIN et al., (2009) em fibras de sisal. Na região interna, Figura 57B, fica aparente que as fibras estão cobertas por material orgânico.

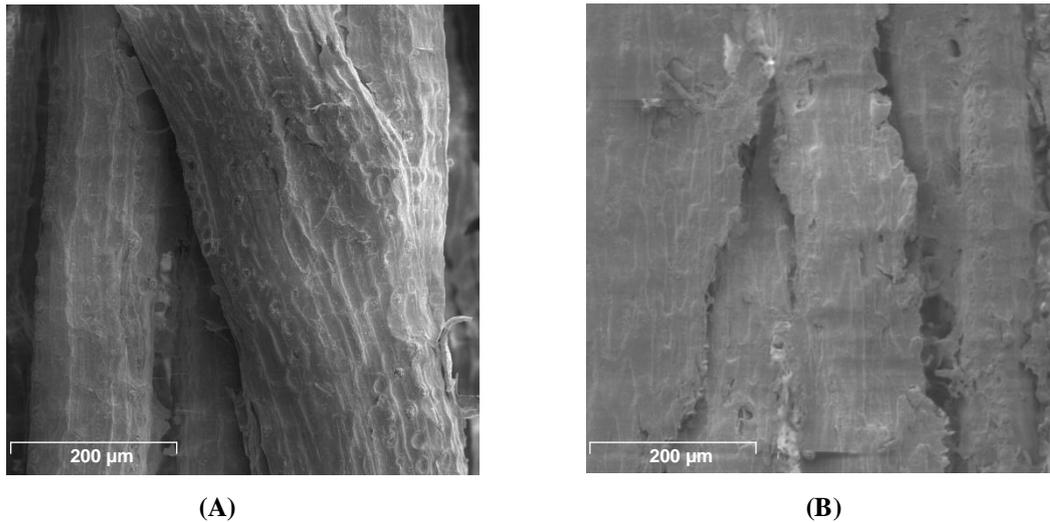


Figura 57 – Superfície externa da fibra (A) com células parenquimáticas e (B) superfície interna recoberta por material orgânico

Em regiões que estavam mais limpas de material orgânico foi possível observar a presença de protruções sobre a superfície das fibras, Figura 58.

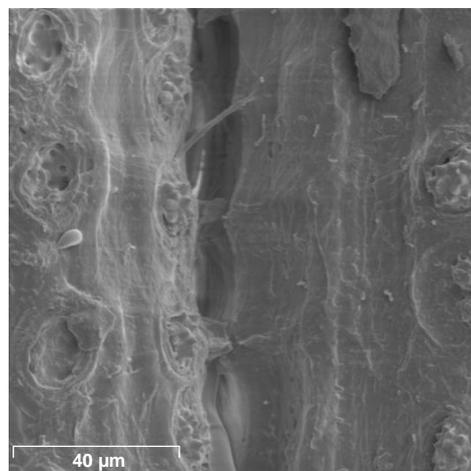


Figura 58 – Detalhe das protruções na superfície da fibra de ubuçu

A Figura 59 ilustra em maior detalhe as protruções mostrando ainda a região onde foi realizada a análise por EDS para identificar os elementos químicos presentes. Através do EDS, as protruções foram identificadas como sendo ricas em Si (Figura 60), o que concorda com estudos morfológicos de outras fibras vegetais, como as de coco, realizado por D'ALMEIDA et al (2007) e também por GEETHAMMA et al (1998), onde tais protruções são chamadas de marcas silicadas. A presença de compostos ricos em Si, notadamente sílica, deve-se ao fato que as fibras possuem naturalmente uma defesa contra o ataque de predadores, pois esta substância torna as fibras mais abrasivas. A presença de Au é devido ao fato da amostra ter sido previamente metalizada.

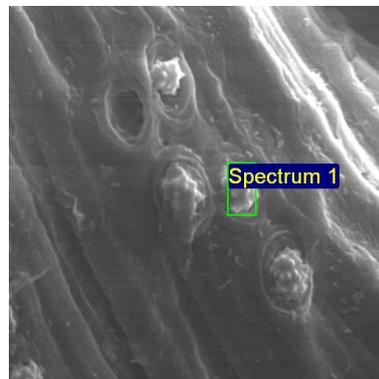


Figura 59 – Protrusão e espectro de EDS da fibra de ubuçu

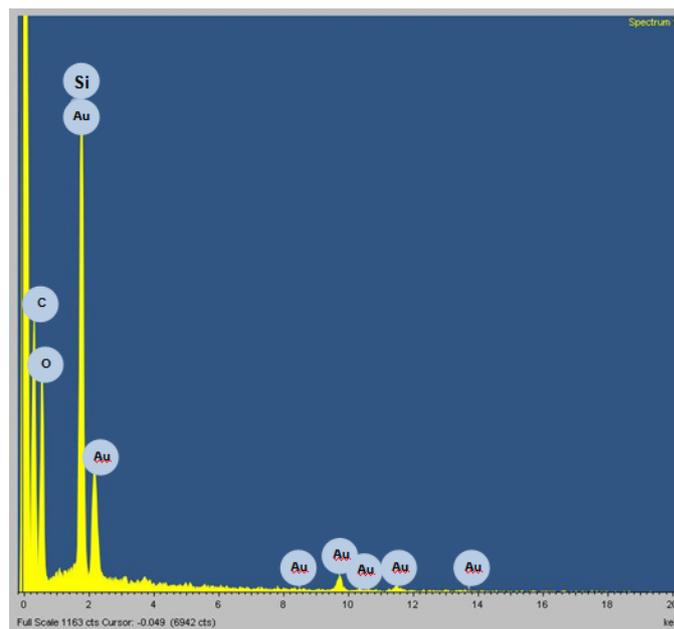


Figura 60 – Espectro de EDS da fibra de ubuçu na protrusão

4.1.2 Difração de Raios X

O espectro da difração de raios-X das fibras está mostrado na Figura 61. O resultado obtido é muito similar àqueles encontrados por D'ALMEIDA et al (2007) para outras fibras lignocelulósicas, como piassava e sisal, e reflete a estrutura cristalina da celulose. O pico principal observado em $22,76^\circ$ corresponde ao plano (002) de difração da celulose nativa. Já o pico mais alargado ao redor de $16,3^\circ$ corresponde ao sinal dos planos (101) e $(10\bar{1})$. O pico em $33,52^\circ$ corresponde ao plano (040), e é também característico da celulose nativa, conforme descrito por RONG et al (2001) e GEORGET et al (1999).

O índice de cristalinidade encontrado para a fibra de ubuçu, de acordo com a equação 1 (página 92) foi de 60,6%. Este valor está coerente com os valores encontrados por RONG et al (2001) para fibras lignocelulósicas como o sisal (62,8%) e para as fibras de madeira do *silvestre pinus* (65,1%) encontrado por TSERKI et al (2005).

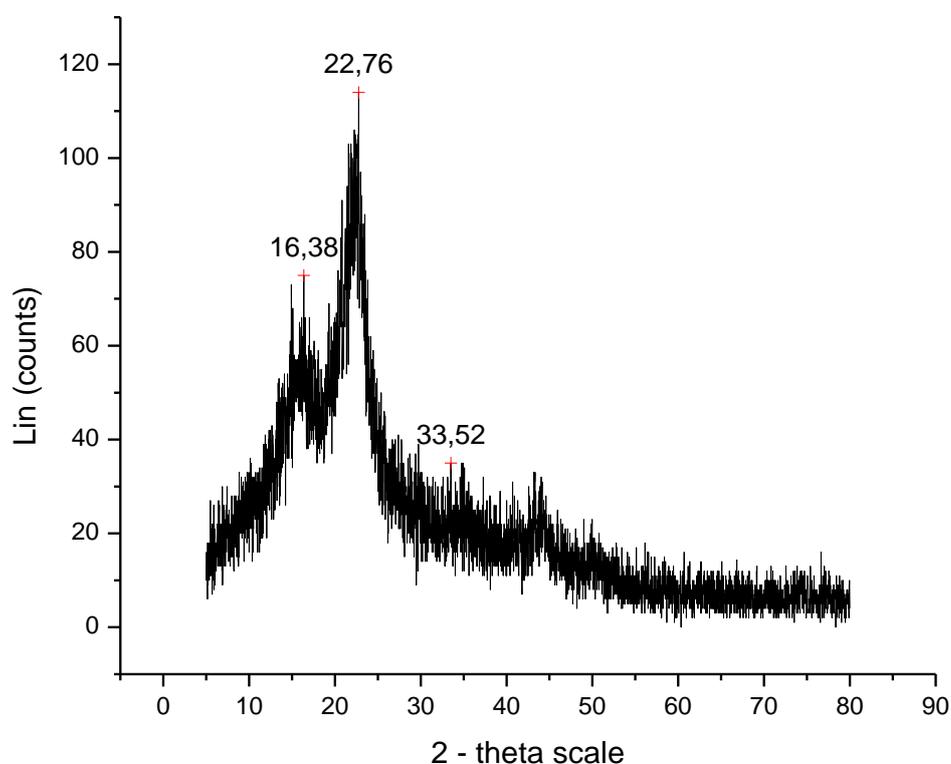


Figura 61 – Difratograma da fibra de ubuçu (Difração de Raios X)

4.1.3 Análise Termogravimétrica – TGA

A Figura 62 apresenta o comportamento geral das curvas de análise termogravimétrica para a fibra analisada neste trabalho.

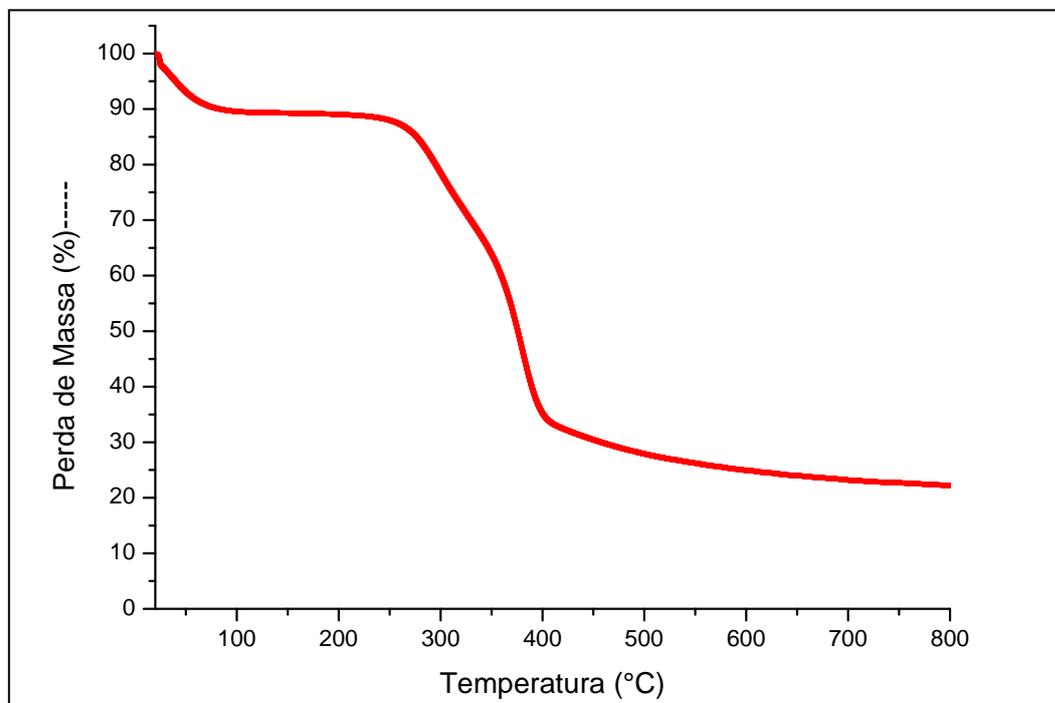


Figura 62 – Curva de TG da fibra de ubuçu

A Figura 63 mostra a mesma curva destacando a % de perda de massa com o aumento da temperatura. À 100°C, a fibra apresentou perda de massa de cerca de 10,45%, relativa à perda de umidade. Esse dado concorda com valores encontrados para outros materiais lignocelulósicos, tal como curauá (em torno de 80°C), encontrado por SANTOS et al., (2009). É observado também na Figura 63 que até 264°C, a fibra de ubuçu pode ser considerada termicamente estável, com pequenas perdas de massa, atribuídas basicamente a perda de umidade. Este comportamento é comparável com o encontrado para as fibras de curauá (D'ALMEIDA, 2007) e para as fibras de sisal (MEGIATTO JÚNIOR, 2006), onde o começo da degradação acontece entre 260 e 300°C.

A segunda etapa de degradação (Figura 64) começa em torno de 265°C e está ligada a decomposição da hemicelulose e esta curva representa a DTG (curva da derivada) deste processo de degradação. Esse valor é comparável com o

encontrado por MEGIATTO JÚNIOR (2006) para a decomposição da hemicelulose do sisal (em torno de 260°C). A temperatura na qual ocorre a taxa máxima de perda de massa nessa região (Figura 64) foi de aproximadamente 299°C. Embora esse valor seja ligeiramente superior ao intervalo de temperatura normalmente associado à decomposição da hemicelulose em fibras lignocelulósicas (de 260 a 281°C), isso não é inesperado, pois a temperatura de degradação pode ser alterada pelas diferenças intrínsecas entre materiais lignocelulósicos de diferentes espécies, de composição, o que acaba afetando todo o conjunto de propriedades das fibras, incluindo os picos de temperatura de degradação (SCHNIEWIND, 1979).

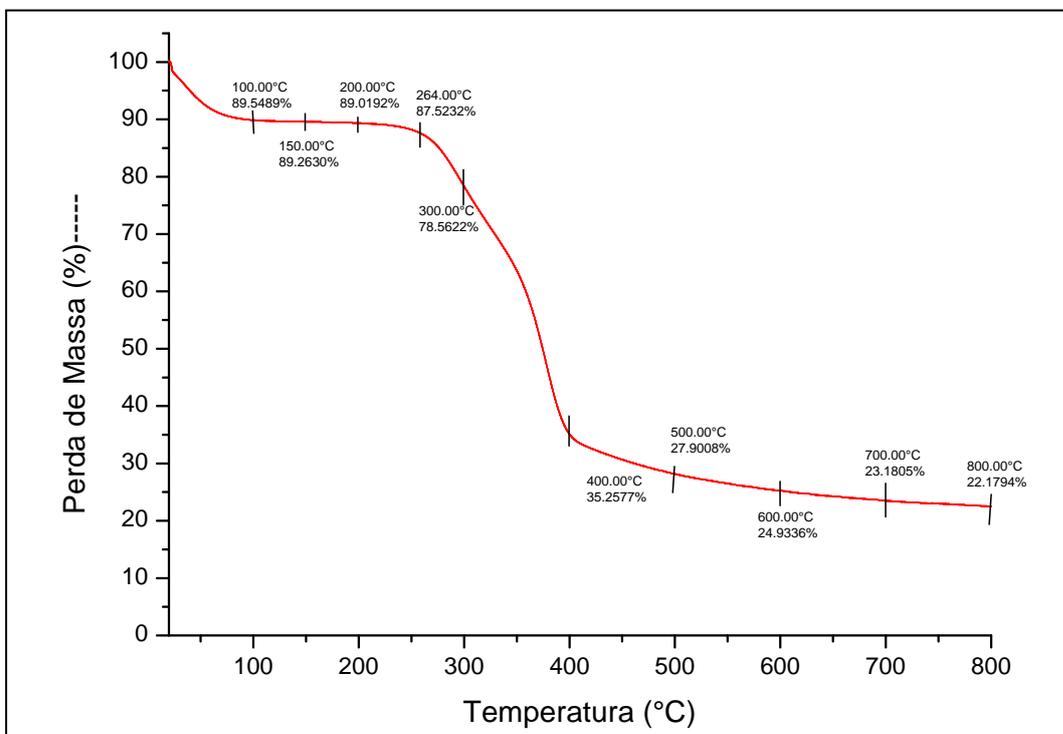


Figura 63 – Curva de TG da fibra de ubuçu com valores

A terceira etapa de degradação está associada à decomposição térmica da celulose. O valor de temperatura no qual ocorre a taxa máxima de perda de massa nessa região foi de 379°C (Figura 64), o que está de acordo com dados reportados para outros materiais lignocelulósicos, tais como o encontrado por OLIVEIRA (2008) para a fibra de sisal (360°C) e por D'ALMEIDA et al (2007) para a fibra de caroá (350°C).

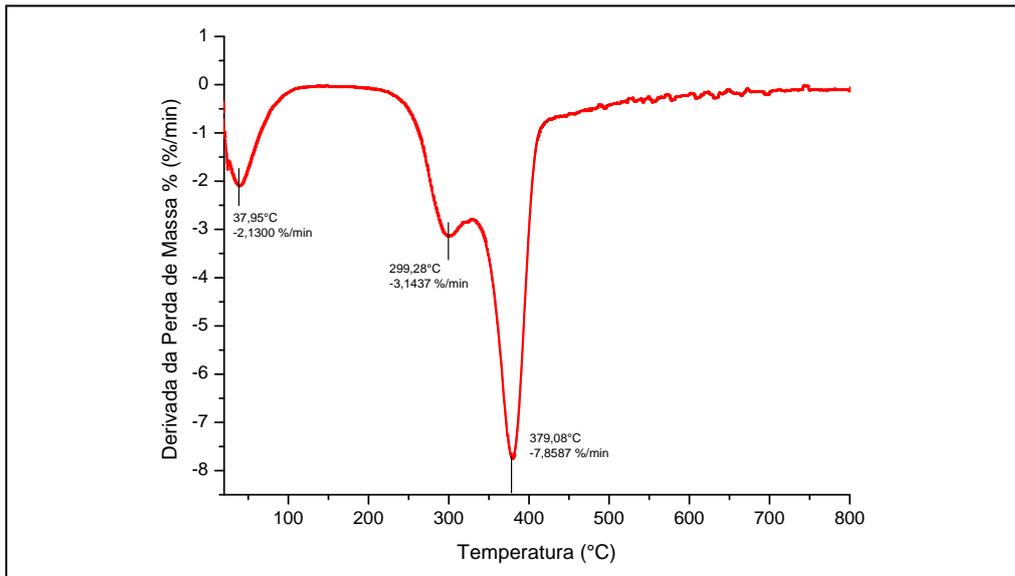


Figura 64 – DTG - Curva da derivada da perda de massa em função da temperatura da fibra de ubuçu

Na Figura 65 está mostrada a curva obtida para avaliar a energia de ativação do principal processo de decomposição da fibra, utilizando o modelo de Kissinger (KISSINGER, 1957). O valor da energia de ativação encontrado para a fibra de ubuçu foi de 180,2 kJ/mol, sendo semelhante com o encontrado para a piassava (185 kJ/mol) e para o curauá (135 kJ/mol), (D'ALMEIDA et al., 2007). O valor da energia de ativação está diretamente relacionado com a estrutura da celulose presente nas fibras lignocelulósicas.

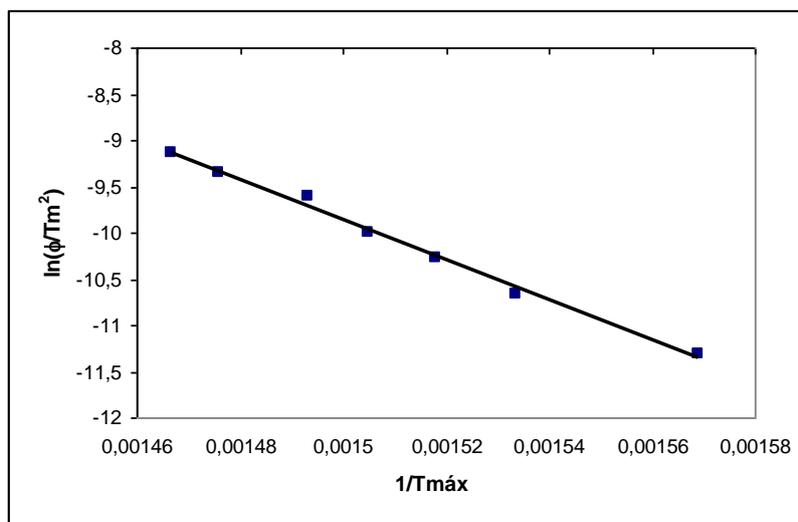


Figura 65 – Cálculo da energia de ativação da fibra de ubuçu

4.1.4 Densidade aparente em relação à água

De acordo com o método do picnômetro adotado para calcular a densidade aparente da fibra em relação à água, foi obtido um valor de 0,97 g/cm³, valor próximo ao encontrado por TANOBE (2003) para a bucha vegetal (0,92 g/cm³).

4.1.5 Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Tabela 11 mostra os principais movimentos para as bandas de absorção no FTIR da celulose, hemicelulose e lignina de acordo com XIAO (2001); FANG (2002); SUN et al., (2004); e MEGIATTO JUNIOR. et al., (2007).

Tabela 11 – Atribuições das bandas de absorção no FTIR.

Comprimento de onda (cm ⁻¹)	Movimentos
3443 - 3400	Estiramento ou deformação axial de grupos O-H
2912 - 2900	Estiramento de ligações C-H (alifático e aromático)
1740 - 1710	Deformação axial de ligações C=O conjugadas do anel aromático
1606, 1513, 1427	Estiramento ou deformação axial de ligações C-C do anel aromático (lignina)
1630	Deformação de angulares de moléculas de água (umidade presente na fibra)
1515 - 1505	Deformação do anel aromático
1470 - 1460	Deformações C-H e vibrações do anel aromático
1421	Deformação axial das ligações -CH ₂ -
1250	Deformação axial assimétrica de ligação C-H, C-O
1000 - 1135	Deformação no plano para ligação das unidades siringila, guaiacila (lignina) e xilanas (hemicelulose)
~ 895	Absorção correspondente a ligações β-glicosídicas entre as unidades de açúcares
~ 340	Deformação C-H fora do plano das unidades ρ-hidrofênica (lignina)

Fonte: XIAO (2001); FANG (2002); SUN et al., (2004); e MEGIATTO JUNIOR. et al., (2007)

A Figura 66 apresenta, inicialmente, o aspecto geral dos espectros de infravermelho das fibras de ubuçu, mostrando bandas típicas dos grupos funcionais presentes em fibras lignocelulósicas [FANG, 2002; SUN 2004; XIAO 2001].

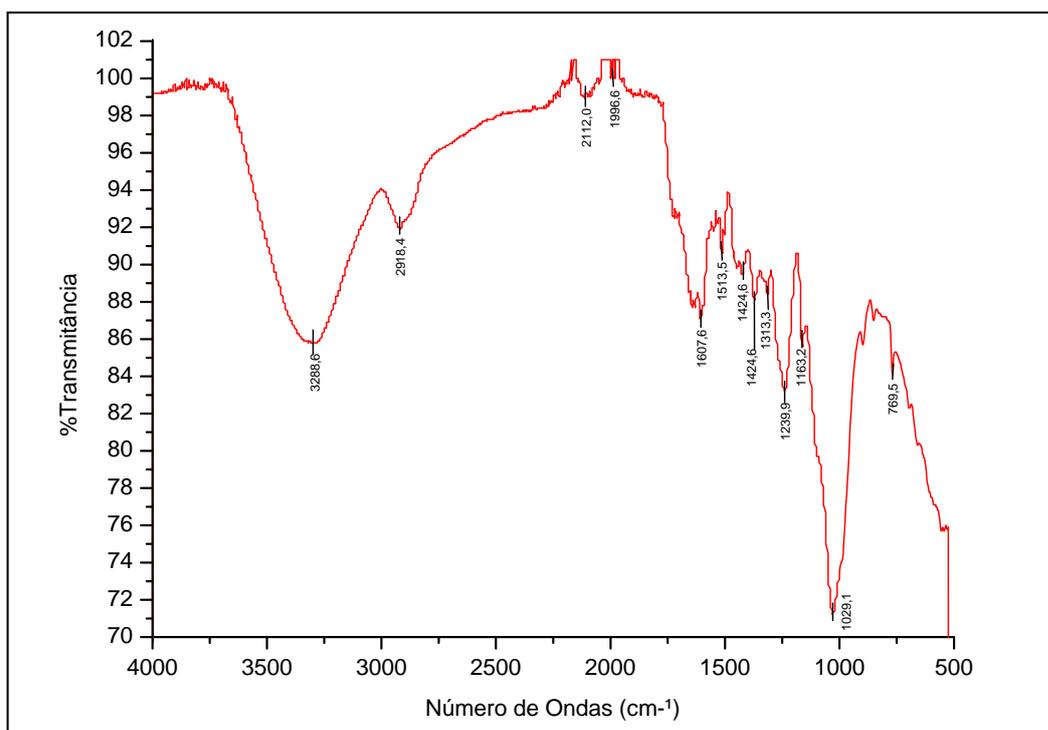


Figura 66 – Espectro no IV para a fibra de ubuçu e suas bandas de absorção

Para melhor entendimento dos resultados obtidos no ensaio de espectroscopia, as bandas do espectro encontram-se descritas separadamente, nas Figuras 67 a 69 a seguir. Na Figura 67 são observadas as bandas de absorção em torno de $3288,6 \text{ cm}^{-1}$ que estão relacionadas ao estiramento dos grupos OH, que correspondem ao sinal característico da vibração axial das hidroxilas da celulose (hidroxilas dos carbonos 2, 3 e 6 da glucose), D'ALMEIDA et al (2005). As bandas de vibração em torno de $2918,4 \text{ cm}^{-1}$ podem estar relacionadas ao estiramento de grupos C-H alifáticos dos carbonos primários e secundários, (FANG, 2002).

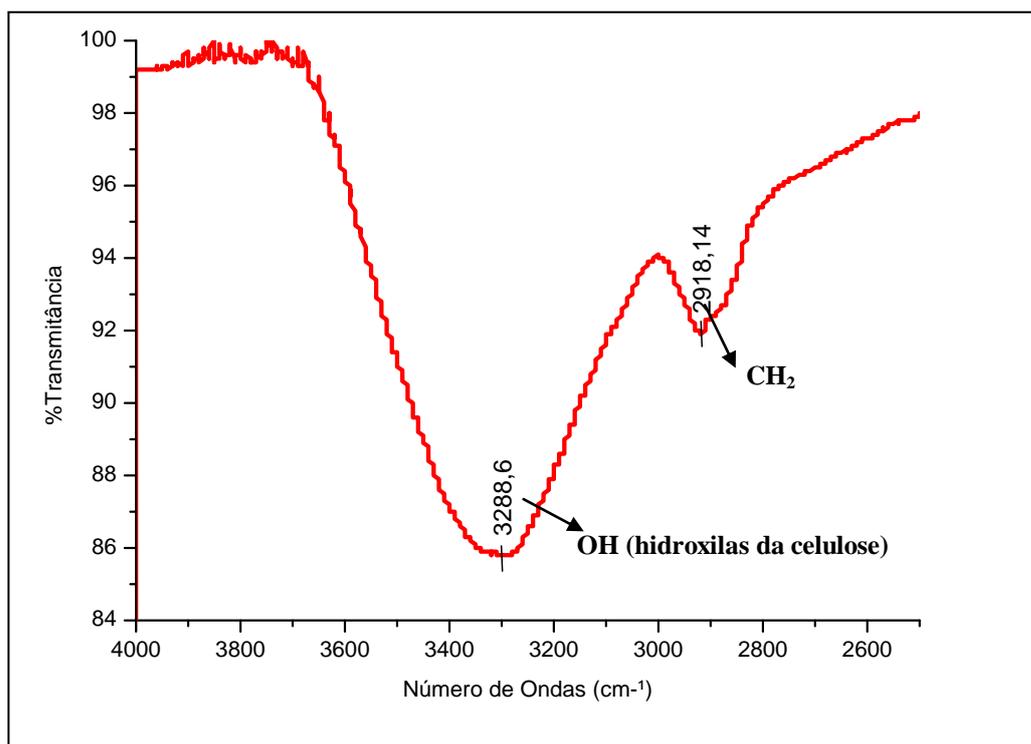


Figura 67 – Espectro IV das bandas de celulose e C-H alifáticos

Na Figura 68 estão relacionadas as bandas que vão de $1996 - 2112 \text{ cm}^{-1}$, que correspondem ao estiramento de ligações C-H de alifáticos e aromáticos (XIAO, 2001). Relacionadas com a lignina encontram-se as bandas em $1607,2 \text{ cm}^{-1}$, atribuído ao grupo acetal relacionado à carbonila das aldoses (D'ALMEIDA & CALADO, 2005). Nos picos de $1513,3 \text{ cm}^{-1}$, $1313,3 \text{ cm}^{-1}$ e $1370,9 \text{ cm}^{-1}$ encontram-se as bandas referentes à hemicelulose e ao estiramento da ligação da ligação C-O de ácidos carboxílicos, JÚNIOR (2006).

Concluindo a análise do espectro de infravermelho da fibra de ubuçu, a Figura 69 ilustra as últimas bandas de absorção encontradas, ou seja, entre 600 e 1400 cm^{-1} .

Observam-se na Figura 69 absorções presentes na região entre $1239 - 1029 \text{ cm}^{-1}$, que são típicos das xilanas, (JÚNIOR, 2006). Já a banda de absorção observada em $769,5 \text{ cm}^{-1}$ pode estar associada a ligações β -glicosídicas entre as unidades de açúcares, XIAO (2001).

Desta forma, é possível afirmar que a fibra de ubuçu apresenta espectro típico de materiais lignocelulósicos, em que se observam bandas referentes à absorção de grupos presentes na celulose, lignina e hemicelulose.

Alterações observadas na grandeza desses sinais permitirão verificar a eficiência de qualquer modificação na superfície das fibras, como por exemplo, um tratamento de acetilação como foi realizado em fibra de coco D'ALMEIDA et al, (2005). Não sendo o caso nesse estudo.

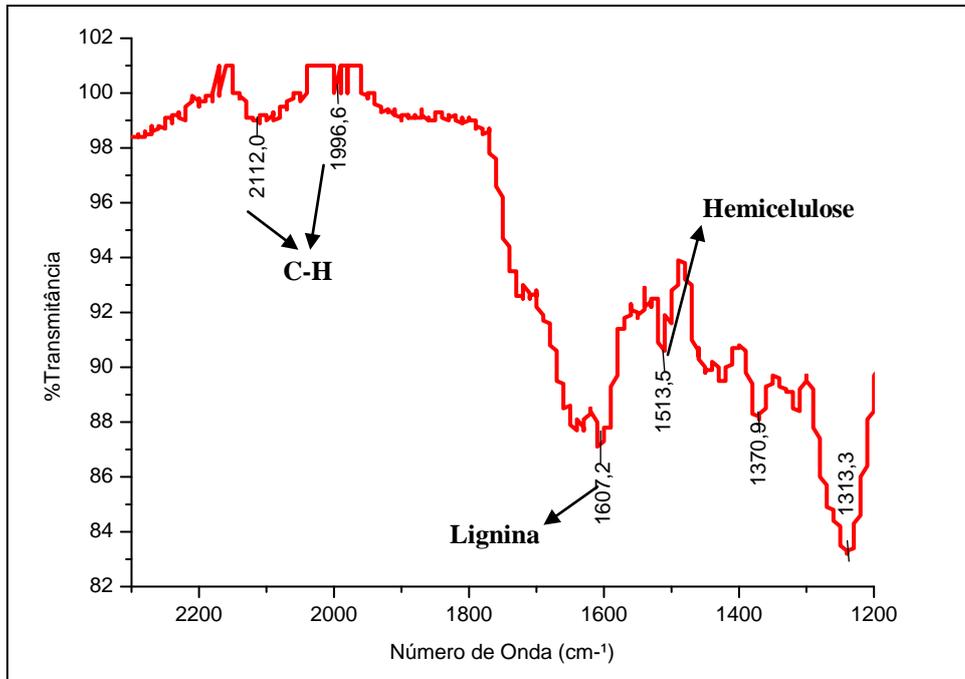


Figura 68 – Espectros IV das bandas relativas à lignina e hemicelulose

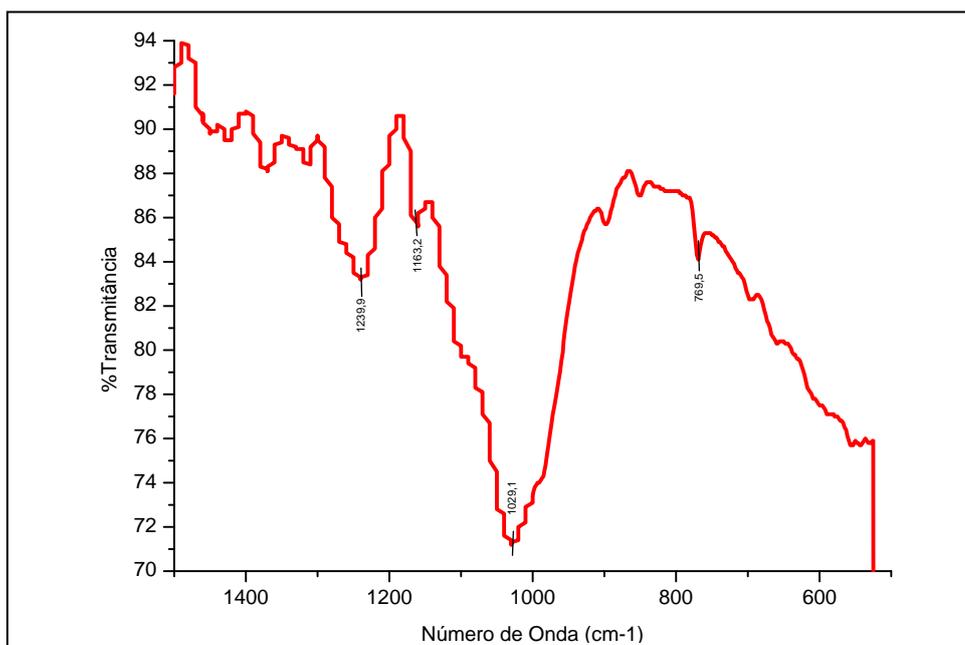


Figura 69 - Espectros IV das bandas entre 769 – 1239 cm^{-1}

4.1.6 Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC

O aspecto global da curva de DSC obtida para a fibra de ubuçu está apresentado na Figura 70. O comportamento observado é semelhante ao obtido para outras fibras lignocelulósicas, MEGIATTO JÚNIOR (2006).

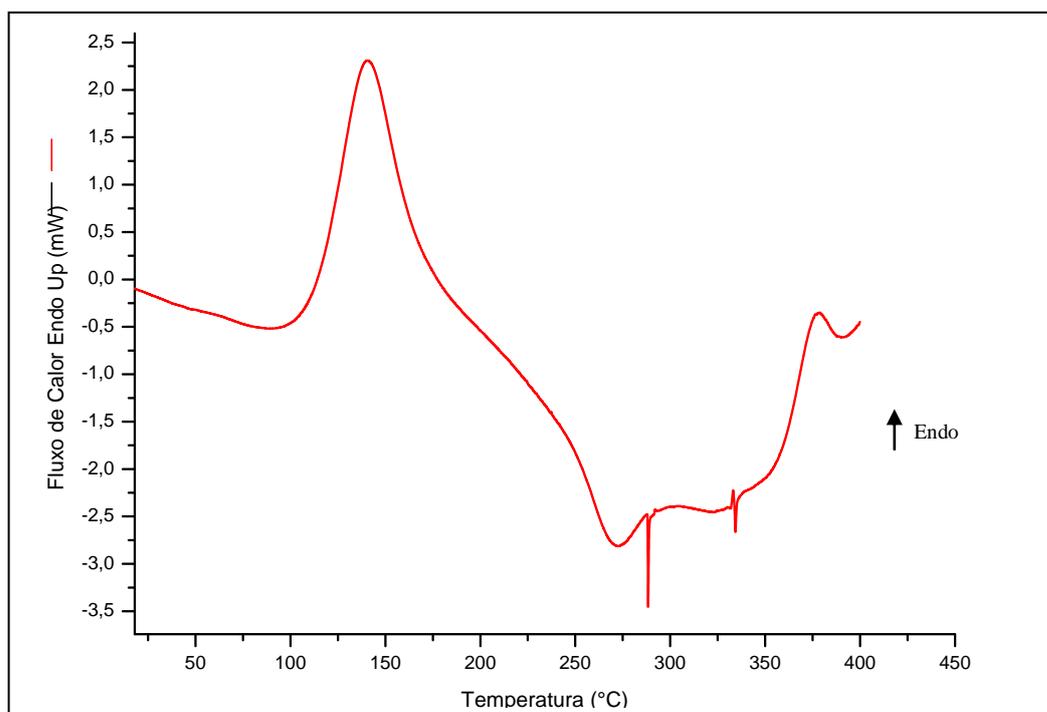


Figura 70 – Curvas de DSC para a fibra de ubuçu

Na Figura 70, podem ser identificados os picos referentes aos três maiores constituintes da fibra, celulose, hemicelulose e lignina, que serão analisados a seguir. Pode-se identificar inicialmente um primeiro pico endotérmico, entre 110°C e 171°C, associado à evaporação da umidade absorvida na fibra. A presença desse pico é comum em fibras lignocelulósicas, RACHINI (2009) e corrobora os resultados do TGA (item 4.1.3). A seguir, observa-se um pico exotérmico, em torno de 270°C, condizente com a decomposição térmica da hemicelulose e de pectinas. Resultado semelhante foi encontrado para fibras de cânhamo (RACHINI, 2009), de juta (PANDEY, 1993) e de sisal (MARTIN et al, 2009). Entre 288 a 292°C, acontece a degradação da fração da hemicelulose, dado este comparável com o encontrado por MARTIN et al., (2009) para a fibra de sisal (297°C).

Na região entre 293°C e 340°C ocorreram picos bruscos que não foram identificados (Figura 71). O tipo de variação indicado sugere uma reação rápida como evaporação violenta de gases ou oxidação (o que não é o caso aqui, pois o ensaio foi realizado sob atmosfera inerte, (PANDEY, 1993).

A seguir, observa-se um pico endotérmico a 370°C devido à decomposição da celulose (PANDEY, 1993). De acordo com BHADURI et al., (1994), esta endoterma (Figura 72) é consequência da desidratação e da despolimerização da celulose da fibra, levando à formação de produtos voláteis inflamáveis. Já CHAND et al., (1987), atribuem esta endoterma a desidratação e à quebra de grupos hidroxila da molécula de celulose, resultando na evolução de água. Em seu trabalho, FAIRBRIDGE et al. (1978), realizaram estudos de decomposição de celulose em atmosferas de nitrogênio e oxigênio e observaram que a degradação da celulose ocorre via duas reações competitivas de primeira ordem, as quais produzem uma fração condensada, uma fração gasosa e cinzas. CARASCHI & LEÃO (1999) caracterizaram a fibra de curauá por análises térmica e química, observaram uma endoterma a 270°C relativa à degradação da celulose, valor relativamente menor ao encontrado para a fibra de ubuçu. Essas pequenas variações se devem às diferentes composições das várias espécies das fibras vegetais.

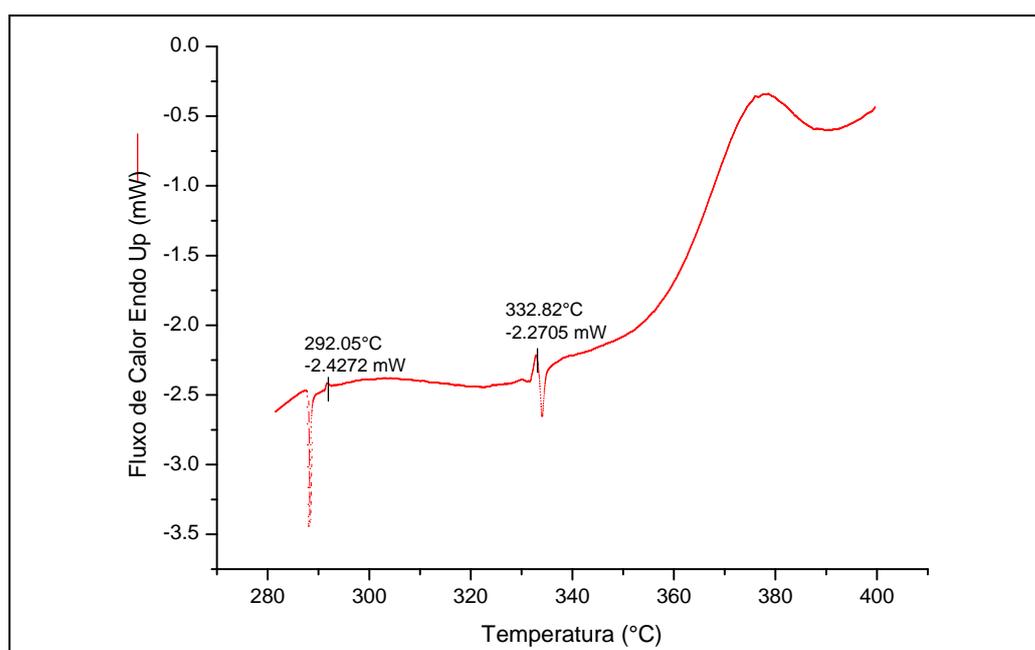


Figura 71 – Picos bruscos identificados na fibra de ubuçu

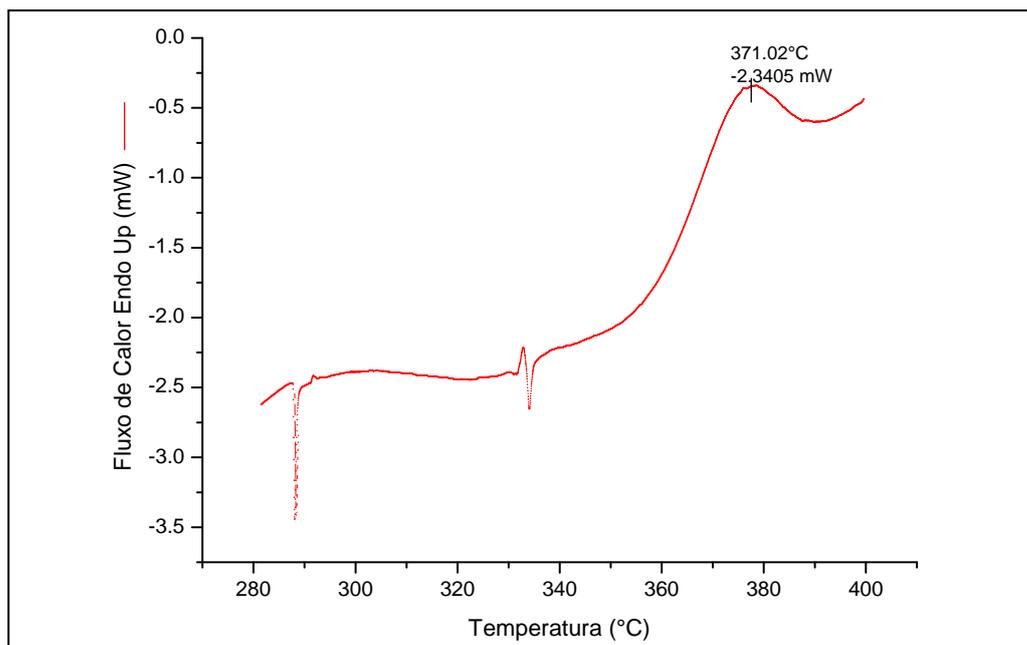


Figura 72 – Detalhe do pico endotérmico de degradação da celulose

4.1.7 Gramatura

A gramatura das amostras de fibras de ubuçu foi comparada com outros três materiais: um tecido de fibra de juta e dois tecidos de fibras de vidro (Figura 73). O objetivo foi analisar qual destes materiais seria mais leve ou mais denso para uma futura utilização como reforço em matriz polimérica.

A amostra do tecido de fibra de juta é do tipo plano (*Basket*), bidirecional, com aproximadamente 2 mm de espessura, composto por fios de juta com aproximadamente 1 mm de espessura. Já as amostras dos tecidos de fibra de vidro também são planas do tipo *Basket*, diferenciando-se na trama/urdume mais fechada (Figura 73 – C) e mais aberta (Figura 73 – D). São tecidos bidirecionais, com aproximadamente 2 mm de espessura e mechas de vidro com aproximadamente 1 mm de espessura.

De acordo com SILVA et al. (2009), o tecido plano é caracterizado pelos cabos da trama entrelaçados nos cabos do urdume, onde os cabos da trama se entrelaçam um acima e um abaixo dos cabos do urdume e assim sucessivamente, sendo que na próxima coluna o que estava em cima passa a estar abaixo e o que estava abaixo passa

por cima e assim sucessivamente ate o final do tecido, como pode ser observado na Figura 74.

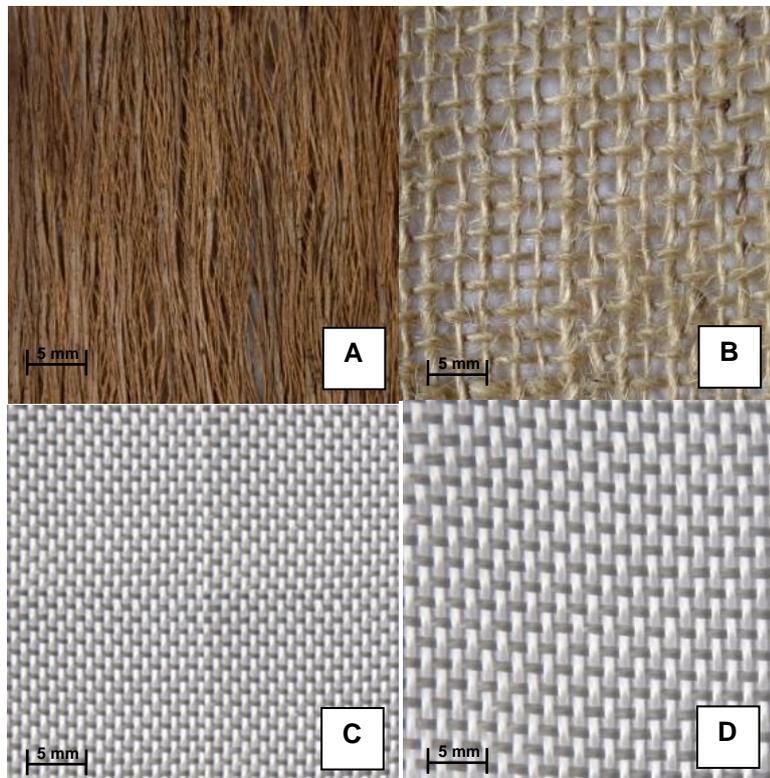


Figura 73 – (A) Fibra de ubuçu; (B) tecido de fibra de juta; (C) e (D) tecido de fibra de vidro

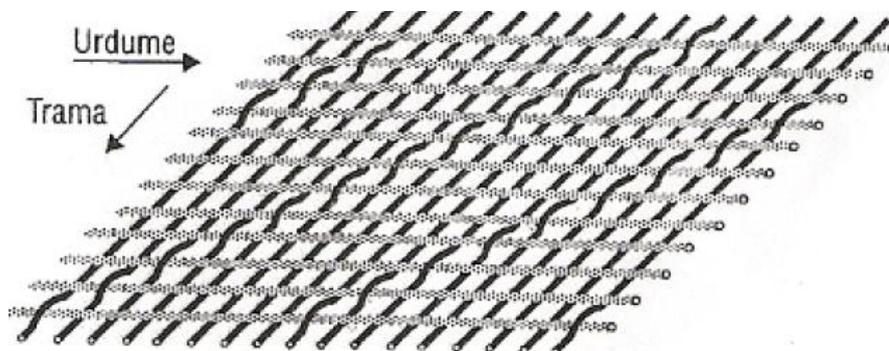


Figura 74. Tecido plano (PARDINI et al., 2006)

O tecido plano *basket* é uma variação do tecido plano, e, para efeito de comparação de gramaturas, foi o tipo de tecido utilizado para a fibra de vidro e a fibra de juta. A Figura 75 ilustra o tecido plano do tipo *basket*.



Figura 75 – Tecido de sisal no plano *basket*

As dez amostras de fibras de ubuçu analisadas apresentaram área de 195 x 100 mm cada uma. De acordo com a norma do ensaio de gramatura, cada amostra foi pesada em balança digital com precisão de 0,0001g. A média dos pesos foi de 3,99g \pm 1,1g e a média das gramaturas foi de 204,7 \pm 57 g/m². Esse valor foi inferior aos valores encontrados por SILVA et al., (2009), para o tecido de sisal do tipo *basket* (440 g/m² a 344 g/m²).

Para o ensaio de gramatura dos tecidos de fibra de vidro, seguiu-se a mesma metodologia adotada para a fibra de ubuçu, ou seja, 10 amostras com dimensões de 195 x 100 mm. A média dos pesos para as amostras dos tecidos de fibra de vidro foi de 4,13g \pm 0,3g e a média das gramaturas foi de 211,7 \pm 17 g/m².

A média dos pesos para as segundas amostras dos tecidos de fibra de vidro foi de 4,67g \pm 0,2g e a média das gramaturas foi de 239,4 \pm 12 g/m².

Assim, é possível concluir que o tecido de fibra de ubuçu é mais leve (204,7 g/m²) que os dois tipos de tecidos de fibra de vidro analisados, o que é vantajoso para a fabricação de compósitos.

No ensaio de gramatura para o tecido de juta foram utilizadas somente duas amostras e computadas os seus pesos e gramaturas conforme procedimento para a fibra de ubuçu e de vidro.

A média dos pesos computados para as amostras do tecido de juta foi 3,93 \pm 0,34g. Encontrou-se uma gramatura média de 201,5 \pm 17 g/m², demonstrando que o tecido de fibra juta analisado é ligeiramente mais leve que a fibra de ubuçu

(204,7 g/m²). É possível concluir, nesta fase, que as fibras vegetais aqui analisadas têm uma gramatura inferior as das fibras de vidro.

No Anexo B estão demonstrados todos os pesos e gramaturas encontrados para cada amostra de tecido analisada no ensaio de gramatura.

De acordo com a norma NBR – 13370, não tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânicos (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinação destes. Os não-tecidos podem ser classificados pelo processo de fabricação, matérias primas, características das fibras/filamentos, processo de consolidação, gramatura, processo de transformação e/ou conversão, ou associação desses elementos. Quanto a gramatura (peso por unidade de área), tem-se: Leve: menor que 25 g/m²; Médio: entre 26 e 70 g/m²; Pesado: entre 71 e 150 g/m² e Muito Pesado: acima de 150 g/m².

Assim, a fibra de ubuçu é considerada como sendo um não-tecido muito pesado, bem como a fibra de juta e de vidro. Porém, os tecidos de fibras lignocelulósicas aqui analisadas (ubuçu e juta) se mostraram mais leves que as de vidro.

4.1.8 Resistência à tração

No ensaio de resistência à tração foi observado que o comportamento das curvas de força versus deslocamento dos corpos de prova da fibra de ubuçu foi bastante variado (Anexo C). As dez amostras apresentaram comportamentos variados, tanto no que diz respeito aos parâmetros quantitativos quanto ao aspecto das curvas força versus deslocamento. O detalhamento da curva força versus deslocamento de cada corpo de prova está no Anexo D.

A variabilidade de comportamento observada no gráfico de força versus deslocamento pode estar diretamente relacionada ao fato das amostras apresentarem gramaturas diferentes, como está demonstrado no Anexo B (Tabela de pesos e gramaturas obtidos para a fibra de ubuçu). Outro fator que pode explicar a variabilidade de comportamento é justamente o aspecto formal de entrelaçamento de cada amostra (umas eram mais entrelaçadas que outras, existindo diferenças nas estruturas dos tecidos). Outro fato que ainda pode ser

diretamente responsável pela variabilidade de comportamento mecânico é a heterogeneidade química e física das fibras vegetais (devendo para tanto, realizar-se futuramente um ensaio químico para comprovar tal hipótese). De acordo com CARVALHO (2005), os tecidos são conjuntos de fibras têxteis e, portanto, também se pode compreender o comportamento descontínuo como resultado das rupturas localizadas, de uma ou de algumas fibras, e a posterior redistribuição de esforços entre as fibras próximas que passam a atuar sob novos níveis de tensão. Ainda na Figura do Anexo C (força versus deslocamento) pode ser observado que uma amostra de ubuçu apresentou um serrilhado na curva, com uma queda de carga constante (corpo 10). Já o restante dos corpos apresentou uma resistência máxima à tração e posteriormente uma queda brusca na curva.

Dois modos de ruptura foram identificados: a ruptura dos elementos da fibra de ubuçu, e o escorregamento das fibras umas sobre as outras, ambos causando deslocamentos razoáveis, fato este também verificado por CARVALHO (2005) ao estudar as fibras de sisal em tração.

De acordo com a figura do Anexo C, a carga máxima suportada no ensaio de tração foi de 596 N para o corpo de prova 6, e a mínima carga suportada foi observada para o corpo de prova 2, ou seja, 263 N. Na Tabela 12 estão listados todos os valores de carga máxima obtidos. A média dos valores foi de 432 N e o desvio padrão foi de 112. O coeficiente de variação foi de 0,26, o que indica a grande variabilidade dos dados.

Tabela 12 – Carga máxima suportada e alongamento na ruptura

Amostras	Carga Máxima (N)	Alongamento na Ruptura (%)
1	368,8	4,9
2	263,1	9,4
3	565,6	6,7
4	388,3	5,0
5	360,2	6,5
6	596,5	8,8
7	498,6	8,7
8	399,0	10,9
9	333,2	7,0
10	551,1	27,4

A Tabela 12 ilustra também o alongamento percentual na ruptura. O maior valor encontrado foi para o corpo de prova 10 (27,4%) e reflete a ruptura progressiva dessa amostra (Figura do Anexo C). O menor alongamento percentual foi obtido pelo corpo de prova 1 (4,9%) que mostra uma falha brusca (Figura do Anexo C).

O valor médio obtido para a carga de ruptura foi de 432 N e comparando-o com dados obtidos na literatura (em se tratando de ensaio de tração para não tecidos) é possível concluir que este valor foi superior ao encontrado por D'ALMEIDA & D'ALMEIDA (2010) para o tecido de juta (em média 360 N) e inferior, ainda que comparável, ao encontrado para a fibra de vidro (645 N).

Para fins de melhor visualização do aspecto da ruptura nos corpos de prova após o ensaio de tração, o Anexo D mostra as amostras testadas e a aparência da curva força versus deslocamento. É possível observar que houve para a maioria das amostras um plano de fratura preferencial, no sentido de crescimento das fibras.

Dois tipos de falha preferencial foram observados. A maioria das amostras apresentou um plano de fratura preferencial, no sentido longitudinal dos corpos de prova e, portanto, paralelo ao sentido das fibras (Ver Figura 56, página 114). Algumas amostras (2, 6 e 7) mostraram um deslizamento efetivo entre a região das garras e o restante do corpo de prova, dando origem a um cedente na borda do corpo de prova.

Segundo CHAND & HASHMI (1993) e GREENBERG et al., (1989), a variação da resistência à tração e módulo de elasticidade estão relacionados diretamente com a variação do índice de cristalinidade (I_c). Ou seja, com a quantidade de celulose presente nas fibras, uma vez que a celulose é o único componente presente na fibra que se cristaliza (ROWELL et al., 1997). Neste sentido, a fibra de ubuçu se encaixa, já que seu índice de cristalinidade foi de 60,6%, bastante compatível com o sisal (62,8%). Porém, foram encontrados estudos que demonstram que as propriedades mecânicas das fibras naturais também estão relacionadas com parâmetros estruturais como o ângulo ou orientação das microfibrilas e cristais de celulose que compõem a fibra, (REDDY, 2005). Em relação a este último item (parâmetros estruturais), seria necessário

realizar um estudo para verificar o ângulo das microfibrilas da fibras de ubuçu e tentar associar aos dados de resistência à tração.

4.2 Caracterização do compósito de fibra de ubuçu e resina de mamona

Nos ensaios realizados, avaliou-se a fibra de ubuçu como reforço para matrizes poliméricas a base de resina de mamona e resina epóxi. Ou seja, esta pesquisa analisou o comportamento de três tipos de materiais compósitos preferencialmente, os Materiais 1, 2 e 3 (conforme especificado na Tabela 13). Para complementar alguns estudos mais específicos, foram confeccionados mais dois compósitos, os Materiais 4 e 5. Assim, deste ponto em diante, para uma leitura mais objetiva e rápida, quando forem expostas informações sobre os compósitos, far-se-á referência aos seus números, ou seja, material compósito 1, 2, 3, 4 ou 5, conforme a Tabela 13 de designação dos materiais. A fração volumétrica de fibras em todos os compósitos foi de 45%.

O Material 4 foi fabricado com o objetivo de se analisar as melhorias ocorridas na interface fibra/matriz (no ensaio de resistência à flexão). Como designado na Tabela 13, a fibra foi seca em estufa por 20 min à 80°C, utilizando-se a matriz de resina de mamona na proporção de 1:1.

O Material 5 foi fabricado com o objetivo de se analisar as propriedades mecânicas (no ensaio de resistência à flexão) em função da mudança da geometria de reforço utilizada. A matriz foi a resina de mamona na proporção de 1:1. Neste material, como dito anteriormente, as fibras foram cortadas manualmente com dimensões aproximadas de 5 mm de comprimento, misturadas à resina de mamona e colocadas no molde metálico.

Tabela 13 – Designação dos materiais compósitos pesquisados

Material Compósito	Designação
1	Fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 1:1 de seus componentes.
2	Fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 2:1 de seus componentes.
3	Compósito formado pela fibra de ubuçu e resina epóxi com formulação recomendada pelo fabricante.
4	Compósito formado pela fibra de ubuçu (seca em estufa por 20 minutos a 80°C) e resina de mamona na proporção 1:1.
5	Compósito formado pela fibra de ubuçu (fibra curta) e resina de mamona na proporção de 1:1.

4.2.1 Ensaio de flexão estática

A Figura 76 ilustra o ensaio de flexão em uma amostra. As médias dos valores de resistência à flexão para cada material são apresentadas na Figura 77. Observa-se que o Material 3 apresentou média de resistência à flexão ($53,1 \pm 14,9$ MPa) maior que a média do Material 1 ($36,7 \pm 9,6$ MPa) e Material 2 ($23,2 \pm 3,1$ MPa), devido provavelmente, a natureza mais rígida da resina epóxi.

Em relação aos compósitos com matriz de poliuretano a média de resistência à flexão encontrada para o Material 1 (36,7 MPa) foi ligeiramente superior ao encontrado para o Material 2 (23,2 MPa), o que comprova que para a formulação da resina de mamona visando sua aplicação em um compósito mais resistente à flexão, é preciso produzi-la levando-se em conta a proporção de 1:1 de seus componentes. O valor médio de resistência à flexão encontrado para o Material 1, pode ser comparado ao encontrado por SILVA (2003) para o

compósito de sisal (tecido) e resina de mamona (da ordem de 45 MPa) e para o compósito com fibras curtas de sisal e resina de mamona (40 MPa). Em ambos os materiais pesquisados por SILVA (2003), esses dados foram para fibras de sisal não tratadas, de modo semelhante ao usado nesse trabalho. Deve ser ressaltado aqui que a fibra de sisal é considerada como uma das mais resistentes entre as fibras lignocelulósicas mais comumente usadas.

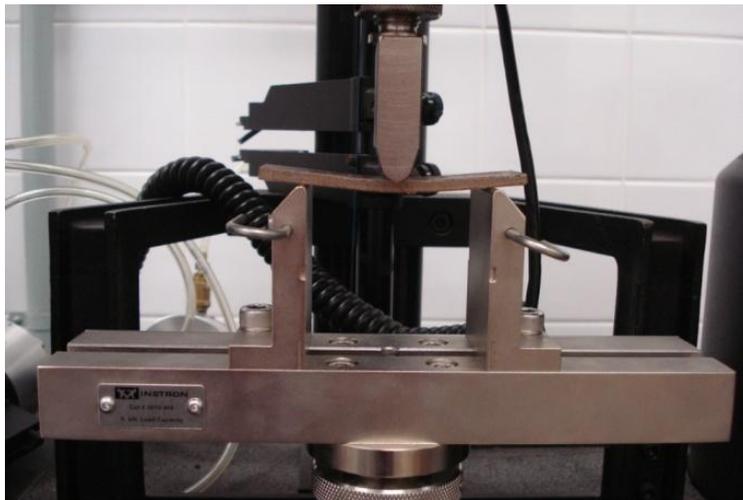


Figura 76 – Início do carregamento em flexão com pequena deformação inicial

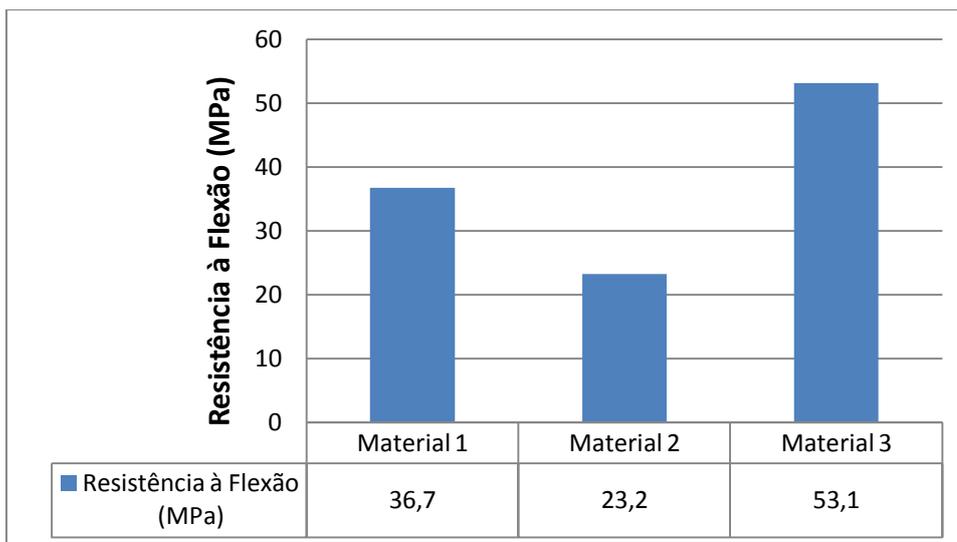


Figura 77 – Resistência à flexão (MPa) dos materiais compósitos estudados

Outro material que pode ser comparado com os dados obtidos para o Material 1 é o compósito formado por coco (fibras tratadas e longas) em matriz de PU, onde foi obtido uma média de resistência à flexão de 42,5 MPa (SILVA, 2003). O valor médio de resistência à flexão obtido para o Material 1 é comparável ao encontrado na literatura para compósitos de fibras vegetais com PU, embora ligeiramente inferior. Levando-se em conta que o compósito aqui desenvolvido foi fabricado sem qualquer tratamento prévio na fibra, visando melhorar sua interface fibra/matriz e conseqüentemente sua resistência, é possível afirmar que o compósito formado pela fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 1:1 é viável tecnicamente e, ainda mais, que um futuro tratamento na superfície das fibras para melhorar a interface fibra/matriz poderá fazer com que esse compósito tenha mais resistência.

O valor de resistência à flexão encontrado para o Material 3 (53,1 MPa), pode ser comparado ao encontrado por PAULA (1996), que obteve um valor médio para o compósito de sisal/epóxi de 67 MPa. Ainda, comparando com outros trabalho que utilizaram matrizes derivadas do petróleo, o valor médio da resistência à flexão para o Material 3 foi superior ao encontrado por ROZMAN (2000) para o compósito coco/PP (36,7 MPa) e ao encontrado por SATYANARAYMA et al., (1990) para o compósito formado por coco/poliéster (38,5 MPa). Outros exemplos de compósitos que podem ser comparados com o valor médio de resistência à flexão encontrado neste trabalho para o Material 3, também podem ser aqui apresentados: POTHAN et al., (1999) pesquisando o compósito banana/poliéster, encontrou um valor médio de resistência à flexão de 10 – 40 MPa; OWOLABI (1998) ao pesquisar o compósito de coco/PF(PF - resina fenol formaldeído), encontrou um valor médio de resistência à flexão de 30,5 – 98,0 MPa. Assim sendo, o resultado médio de resistência à flexão encontrado para o Material 3, apresenta-se bastante compatível com o de outros materiais compósitos encontrados na literatura, o que reforça a viabilidade técnica de uso da fibra de ubuçu como reforço em matrizes de origem petrolífera (epóxi, poliéster, PP, PF).

A Figura 78 apresenta a média dos valores obtidos para o módulo de elasticidade em flexão para os materiais analisados. É possível observar na Figura 79, que o Material 3 apresentou módulo de elasticidade maior ($6,5 \pm 0,4$ GPa) que

o Material 1 ($2,2 \pm 0,2$ GPa) e que o Material 2 ($0,9 \pm 0,1$ GPa). Os valores obtidos são compatíveis com o fato da resina epóxi ter módulo de elasticidade (rigidez) maior que a resina de mamona, já que a fração volumétrica de carga utilizada foi a mesma nos três sistemas.

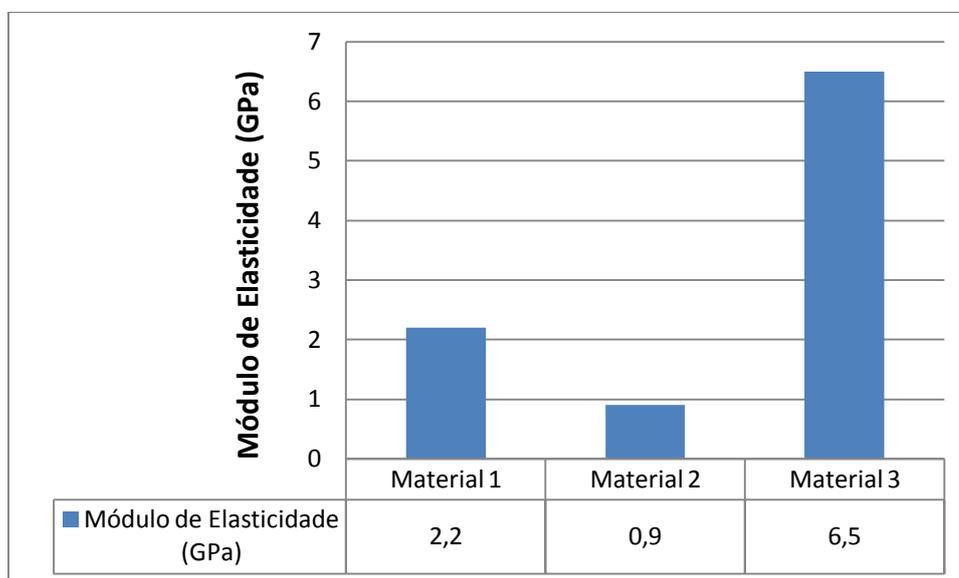


Figura 78 – Média dos valores do módulo de elasticidade para os compósitos analisados

A média de valores do módulo de elasticidade do Material 1 (2,2 GPa) foi semelhante ao encontrado por SILVA (2003) para o compósito de sisal na forma de tecido sem tratamento e resina de mamona (2,0 GPa), bem como também é semelhante ao valor de 2,3 GPa para o compósito sisal na forma de tecido com tratamento e resina de mamona. Outra comparação de valores ainda pode ser realizada entre o módulo de elasticidade do Material 1 (2,2 GPa) e o obtido por SILVA (2003) para o compósito coco (sem tratamento)/resina de mamona (1,6 GPa) e coco (com tratamento)/resina de mamona (2,19 GPa). O Material 2 apresentou uma rigidez bem mais baixa que a do Material 1, pois a proporção de componentes em 2:1 não é a mais indicada quando se deseja um comportamento com maior rigidez do compósito em questão.

O Material 3 apresentou média de valor do módulo de elasticidade de 6,5 GPa. Esse valor pode ser comparado ao encontrado por PAULA (1996) para o compósito sisal (sem tratamento)/epóxi (5,2 GPa) e para o compósito sisal(com

tratamento)/epóxi (6,7 GPa). O valor médio da rigidez obtida pelo Material 3 foi superior ao encontrado por ROZMAN (2000) para o compósito coco (sem tratamento)/PP (0,95 GPa) e para o compósito coco (com tratamento)/PP (3,9 GPa). POTHAN et al., (1999) ao pesquisar o módulo de elasticidade em flexão do compósito banana/poliéster, encontrou um valor entre 2,3–5,3 GPa. Dessa forma é possível concluir que o Material 3 apresentou rigidez compatível aos compósitos apresentados pela literatura, em se tratando do uso de fibras vegetais como reforço em matrizes poliméricas de origem petrolífera.

De acordo com SILVA (2003), no ensaio de flexão, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade são controlados pela resistência do material localizado na superfície do compósito. A trinca sempre se inicia na região trativa do corpo de prova e se propaga para o lado compressivo. Desta forma, as fibras que efetivamente atuam reforçando o compósito são as localizadas do lado trativo do corpo de prova e orientadas na direção da tensão aplicada. As fibras com orientação perpendicular a esta, atuam no sentido de diminuir a resistência mecânica do compósito e, neste caso, a resistência à flexão é dominada pela resistência à flexão da matriz. Os bons resultados mecânicos obtidos em comparação com os dados referentes a outros compósitos podem ser atribuídos ao fato da fibra de ubuçu poder ser encarada como sendo um tecido unidirecional, conforme ilustrado na Figura 56, página 114.

Visando melhorar a interface fibra/matriz do compósito correspondente ao Material 1 (já que o objetivo maior da pesquisa é a viabilidade técnica de um material ecológico), foi proposto a fabricação de um compósito onde a fibra foi previamente seca em estufa por 20 minutos, a uma temperatura de 80°C. Este procedimento foi recomendado pela pesquisadora Laura Hecker de Carvalho²⁰ e adotado com o objetivo de redução da umidade absorvida pela fibra. Para fabricação das placas, utilizou-se da mesma metodologia adotada para os outros materiais.

A Figura 79 apresenta uma comparação entre os valores médios de resistência à flexão dos compósitos fabricados com a resina de mamona na proporção 1:1. Observa-se que a secagem da fibra de ubuçu em estufa para retirada da umidade e conseqüentemente melhora na interface fibra/matriz foi

²⁰ Professora da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), Curso de Engenharia de Materiais. Procedimento recomendado quando da Defesa da Proposta de Tese.

pouco eficiente, não diferindo estatisticamente (T-test) a resistência à flexão do Material 4 ($40,1 \pm 4,9$ MPa) em relação ao encontrado para o Material 1 ($36,7 \pm 9,6$ MPa).

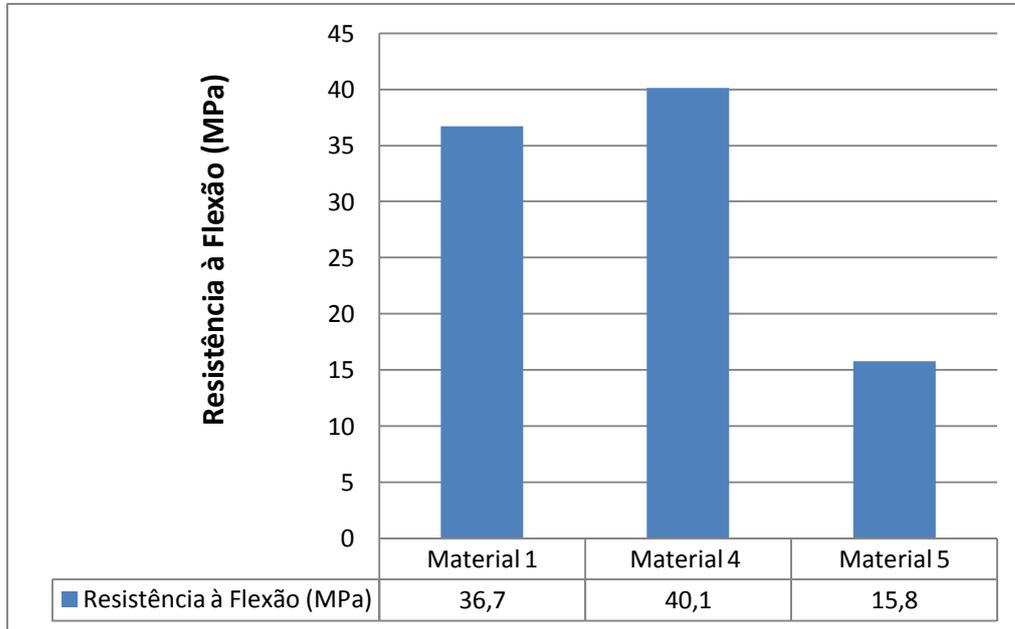


Figura 79 – Resistência à flexão dos compósitos com resina de mamona 1:1

De acordo com D'ALMEIDA (2007), a secagem da fibra em estufa visa a redução da umidade presente na mesma, e, reduzindo-se esta umidade a interface fibra/matriz é consideravelmente melhorada, já que a fibra irá aderir melhor a matriz, atingindo valores de resistência mecânica superiores aos da fibra utilizada sem secagem. Neste estudo, porém, foi verificado que não houve melhora significativa das propriedades do compósito com a secagem das fibras de ubuçu (tururi). Devendo-se repetir tal procedimento para retirada de qualquer dúvida em relação ao comportamento da interface fibra/matriz quando esta é seca em estufa.

A Figura 80 apresenta uma comparação entre os valores médios do módulo de elasticidade dos compósitos fabricados com a resina de mamona na proporção 1:1 de seus componentes.

Observa-se que o módulo de elasticidade em flexão do Material 4 ($1,8 \pm 0,3$ GPa) é ligeiramente inferior ao do Material 1 ($2,2 \pm 1,2$ GPa). Porém, a rigidez do

Material 4 apresenta-se em escala de valores comparável às dos encontrados em compósitos similares na literatura (SILVA, 2003).

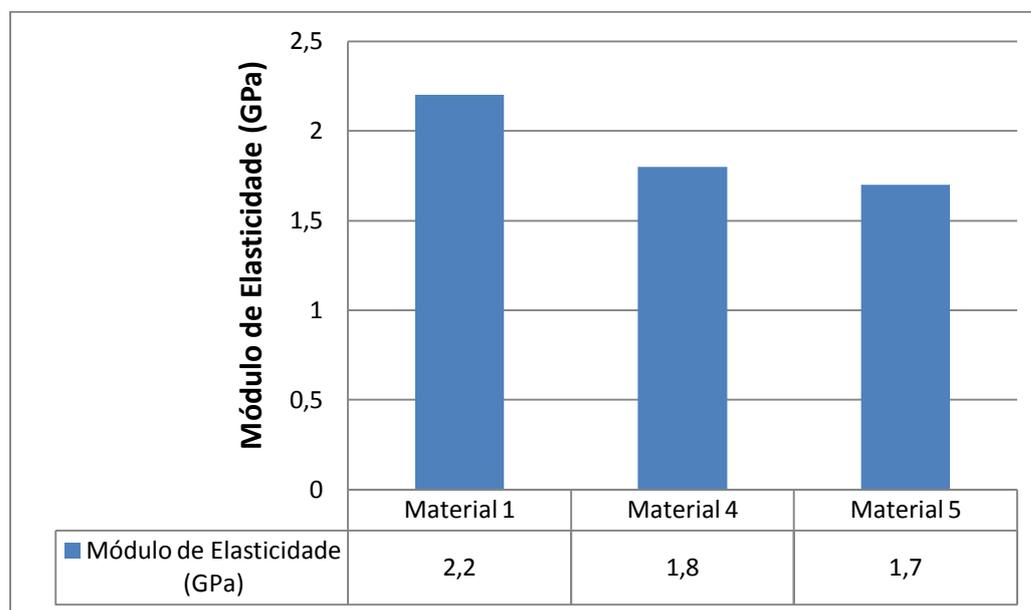


Figura 80 – Módulo de elasticidade dos compósitos fabricados com resina de mamona 1:1

Para analisar o efeito da geometria do reforço na resistência à flexão, foi fabricada também uma placa de compósito com fibras de ubuçu picadas e curtas (comprimento aproximado de 5 mm). O resultado obtido também está mostrado nas Figuras 79 e 80. Para fabricação desse compósito (Material 5), foi utilizado o mesmo percentual de fibras utilizado nos compósitos anteriores fabricados com as fibras não picadas de ubuçu.

Observa-se na Figura 79 que o valor médio de resistência à flexão encontrado para o Material 5 (15,8 GPa) foi inferior aos valores médios encontrados para todos os outros compósitos com resina na proporção 1:1. Esse resultado corrobora a suposição de que o bom comportamento à flexão obtido (Figuras 79 e 80) pode ser associado ao direcionamento observado nas fibras de ubuçu (Figura 56). Dessa forma, a geometria natural da fibra deve ser levada em consideração quando da fabricação dos compósitos. Porém, o valor encontrado é comparável ao encontrado por SILVA (2003) para o compósito de sisal (fibra curta sem tratamento) e resina de mamona (22,9 MPa).

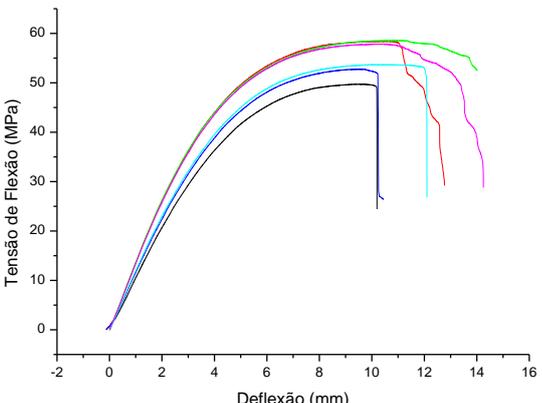
Sabe-se que nos compósitos com fibras curtas as extremidades das fibras atuam como pontos de concentração de tensão e assim funcionam como regiões de iniciação de trincas (AGARWAL; BROUTMAN, 1990). Sob flexão, as fibras que efetivamente atuam no reforçamento do compósito são as localizadas no lado trativo do corpo de prova e orientadas na direção da tensão aplicada. Assim, no caso das fibras curtas, uma menor fração de fibras está efetivamente contribuindo para o comportamento do compósito, embora ele tenha a mesma fração volumétrica de fibras que o compósito 1.

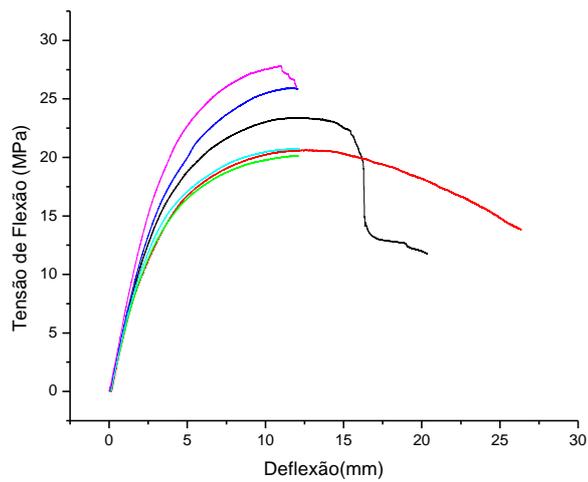
O resultado do módulo de elasticidade do compósito com fibras curtas também está mostrado na Figura 80. Observa-se que o valor do módulo de elasticidade encontrado para o Material 5 (1,7 GPa) é bem próximo ao do Material 4 (1,8 GPa) e inferior ao do Material 1 (2,2 GPa).

Para melhor visualização da diferença do comportamento à flexão dos diversos compósitos o perfil das curvas tensão de flexão (MPa) versus deflexão (mm) está mostrado no Quadro 2.

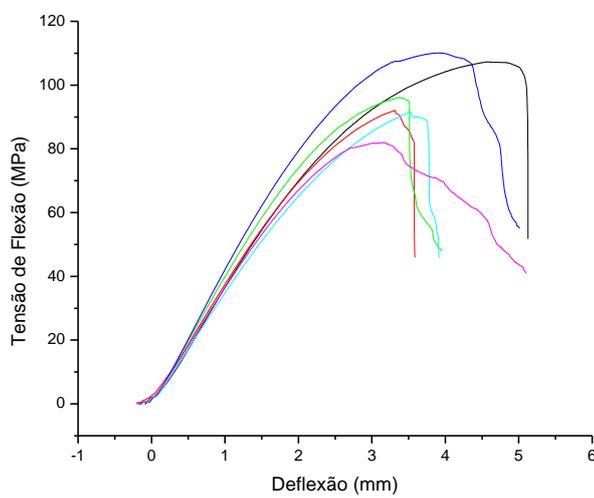
De acordo com SILVA (2003), no ensaio de flexão, a resistência à flexão e o módulo de elasticidade são controlados pela resistência do material localizado na superfície do compósito. A trinca sempre se inicia na região trativa do corpo de prova e se propaga para o lado compressivo. Desta forma, as fibras que efetivamente atuam no reforçamento do compósito são as localizadas do lado trativo do corpo de prova e orientadas na direção da tensão aplicada.

Quadro 2 – Aspectos das curvas de tensão de flexão e extensão de flexão

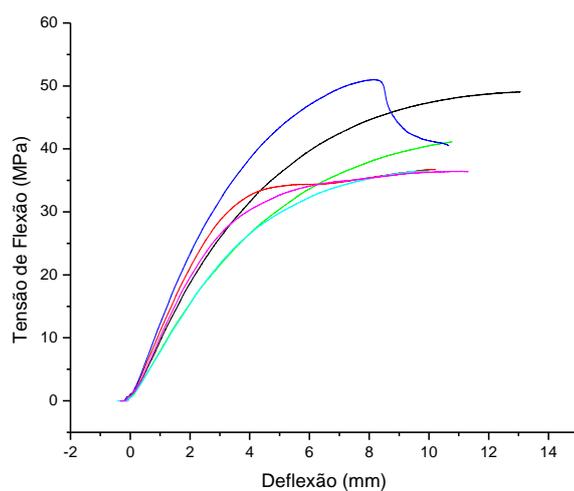
Perfil das Curvas	Comentários
	<p>Material 1 É possível observar a uniformidade no comportamento mecânico do material. Existência de trinca na região trativa. Sem ruptura total da amostra.</p>

**Material 2**

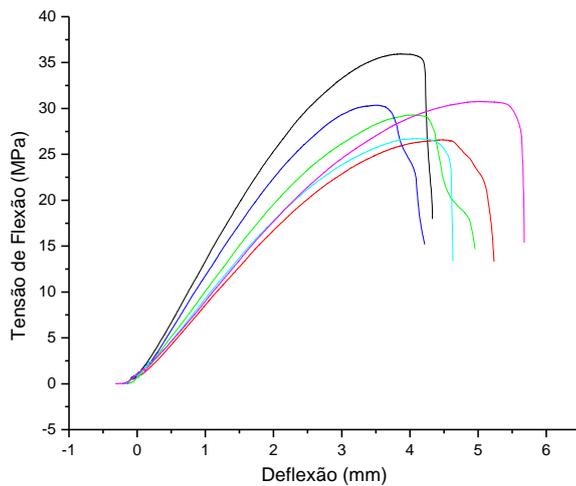
Uniformidade do material e maior capacidade de deformação. Não houve formação de trinca na região trativa. Deflexão máxima. Sem ruptura total da amostra.

**Material 3**

É possível observar a uniformidade no comportamento mecânico do material. Menor capacidade de deformação. Existência de trinca na região trativa. Sem ruptura total da amostra.

**Material 4**

É possível observar a uniformidade no comportamento mecânico do material. Não houve formação de trinca na região trativa. Deflexão máxima. Sem ruptura total da amostra.



Material 5

É possível observar a uniformidade no comportamento mecânico do material. Existência de trinca na região tratativa. Sem ruptura total da amostra.

Para melhor visualização dos tipos de falha ocorridos no ensaio de flexão, o Quadro 3 ilustra o aspecto dos corpos de prova após o ensaio, bem como alguns comentários a respeito do tipo de ruptura ocorrido. De cada grupo analisado, foi pega uma amostra para realizar os comentários.

Quadro 3 – Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de flexão

Corpos de prova	Comentários
	<p>Material 1</p> <p>Existência de trinca na região tratativa. Não houve ruptura total do corpo de prova.</p>

**Material 2**

Não houve formação de trinca na região tratativa. Houve deflexão máxima. Não houve ruptura total do corpo de prova.

**Material 3**

Existência de trinca na região tratativa. Não houve ruptura total do corpo de prova.

**Material 4**

Não houve formação de trinca na região tratativa. Houve deflexão máxima. Não houve ruptura total do corpo de prova.

**Material 5**

Existência de trinca na região tratativa. Não houve ruptura total dos corpos de prova.

4.2.2 Ensaio de compressão paralela

O ensaio de compressão paralela às fibras foi realizado apenas com os três materiais iniciais, ou seja, Material 1, 2 e 3. A Figura 81 apresenta os resultados de resistência à compressão para cada corpo de prova dos materiais analisados.

Na Figura 82 são apresentados os valores médios da tensão de ruptura dos corpos de prova. Observa-se que a maior resistência foi apresentada pelas amostras do Material 3, ou seja, o compósito formado pela fibra de ubuçu e a resina epóxi, com média de $48,8 \pm 2,46$ MPa. A menor média ($8,1 \pm 1,83$ MPa) foi obtida pelo Material 2, ou seja, fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção de 2:1, mais uma vez, provavelmente pela quantidade de polioli e pré-polímero na proporção de 2:1 ser mais flexível que o da proporção 1:1, o que o fez atuar como plastificante. O Material 1 apresentou uma média de tensão de ruptura de $29,1 \pm 0,99$ MPa.

Mesmo o objetivo desta pesquisa não sendo a aplicação do material no sentido vertical para fabricação de pisos, o ensaio de compressão paralela se faz necessário por proporcionar a oportunidade de observação do comportamento mecânico do compósito no sentido vertical.

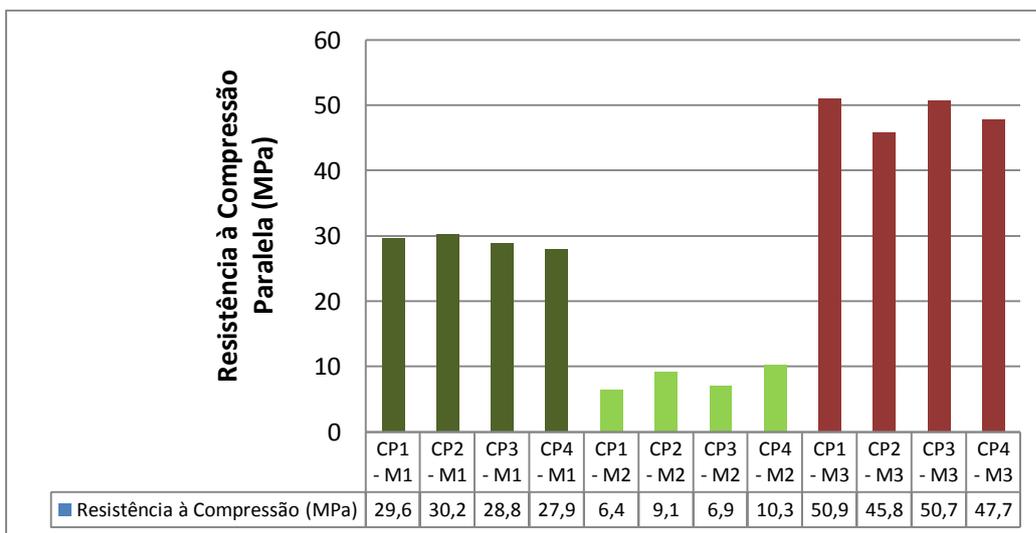


Figura 81 – Valores de resistência a compressão para cada corpo de prova dos materiais analisados

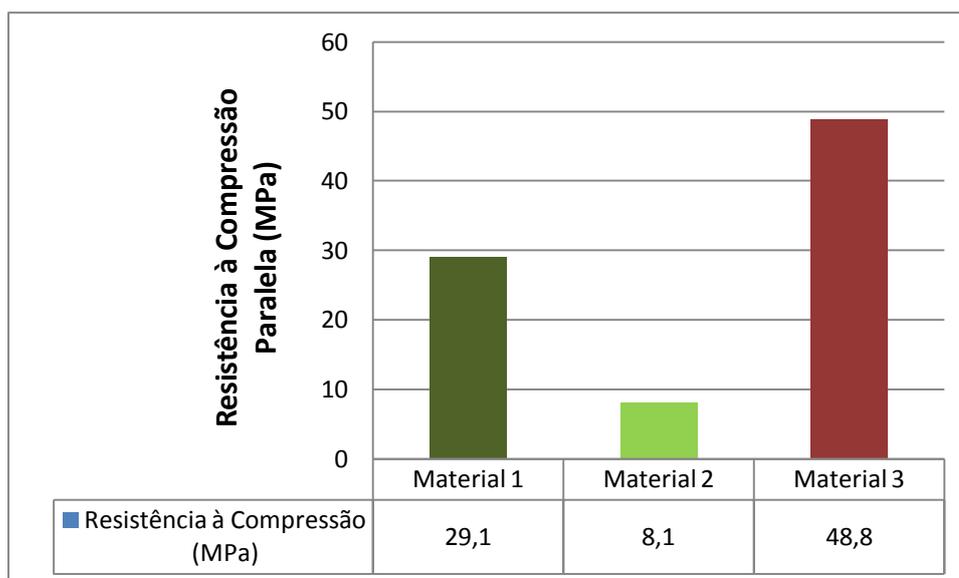


Figura 82 – Valores médios de resistência à compressão para os três materiais analisados

Os resultados de tensão de ruptura obtidos para os compósitos 1 e 3 no ensaio de compressão paralela foram inferiores aos encontrados por OLIVEIRA (2005) para o compósito de bambu laminado e resorcinol (40,74 MPa) e aos encontrados por GARBINO et al., (2002), da ordem de 55 MPa, para o mesmo tipo de compósito.

Pelos resultados encontrados para o Material 2 (8,1 MPa) fica evidente que esta proporção não apresentou boa resistência à compressão, já que os corpos de prova flambaram de modo elástico em suas bases. O valor obtido de resistência à compressão paralela para o Material 1 (29,1MPa) é comparável aos valores encontrados por FREIRE & BERALDO (2003) para o compósito de bambu laminado e resorcinol formaldeído (30 MPa).

As Figuras 83, 84 e 85 ilustram os comportamentos das curvas de tensão (MPa) versus alongamento (mm) dos corpos de prova de compressão paralela para cada material analisado. Pode-se observar que, com exceção do Material 2, os 4 exemplares de cada material apresentaram comportamentos uniformes, tanto no que diz respeito aos parâmetros quantitativos quanto no aspecto das curvas.

Observa-se na Figura 84 que duas amostras do Material 2 apresentaram baixa resistência à compressão (corpos 1 e 3) e duas amostras apresentaram uma maior resistência à compressão, bem como uma maior capacidade de deformação.

Porém, não houve diferença no modo de falha entre esses corpos de prova, ou seja, todos flambaram (de modo elástico) na linha de colagem, porém não trincaram ou apresentaram fratura, devendo-se este fato a uma maior flexibilidade da matriz na proporção 2:1 de seus componentes.

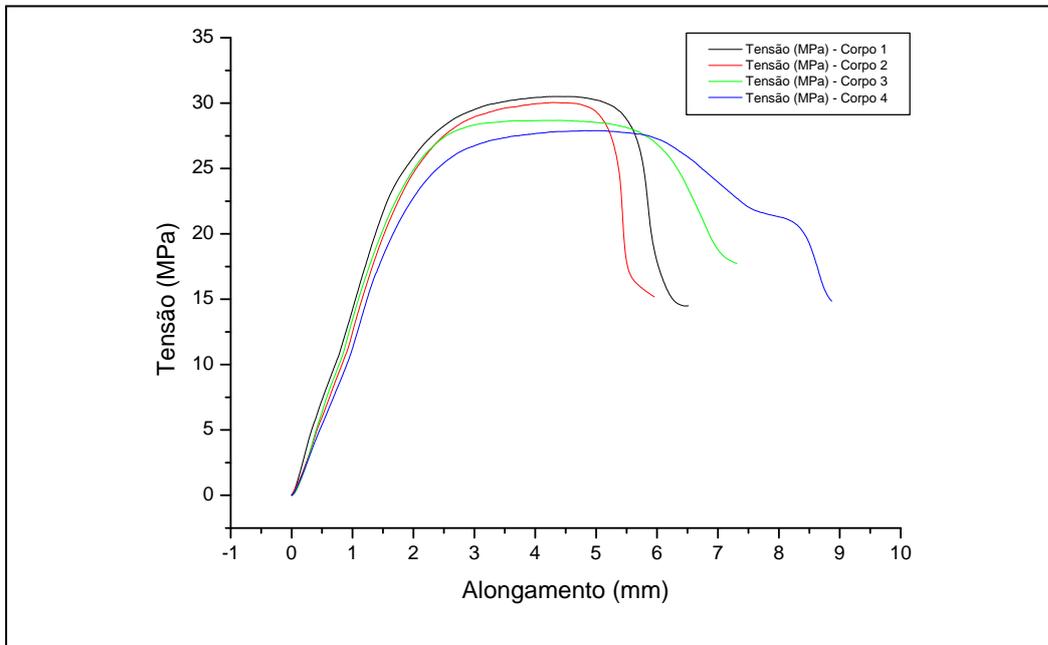


Figura 83 – Aspecto das curvas tensão (MPa) versus alongamento (mm) para as amostras do Material 1 – Ensaio de compressão paralela

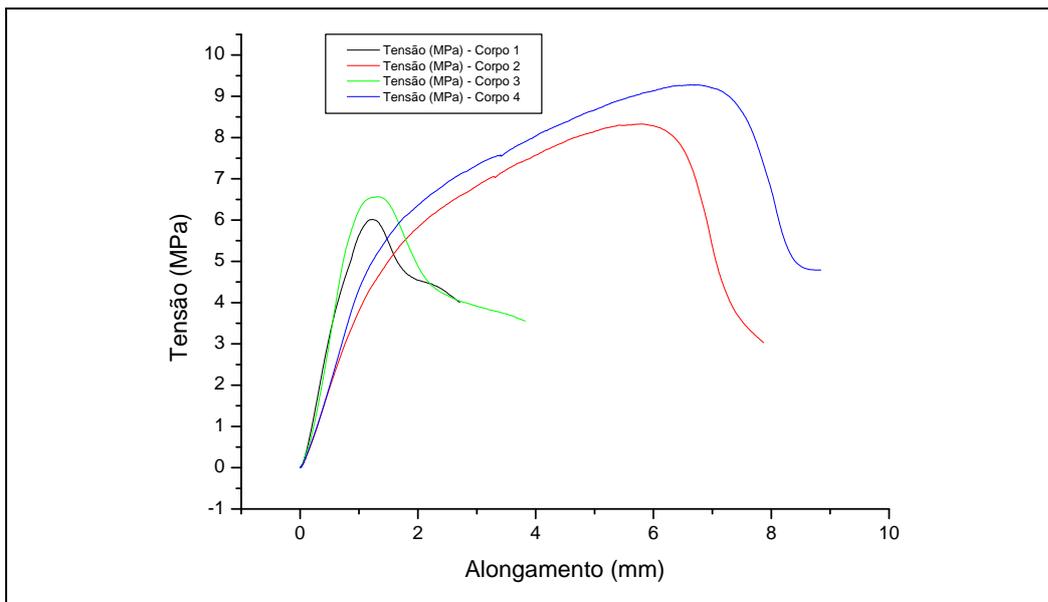


Figura 84 – Aspecto das curvas tensão (MPa) versus alongamento (mm) para as amostras do Material 2 – Ensaio de compressão paralela

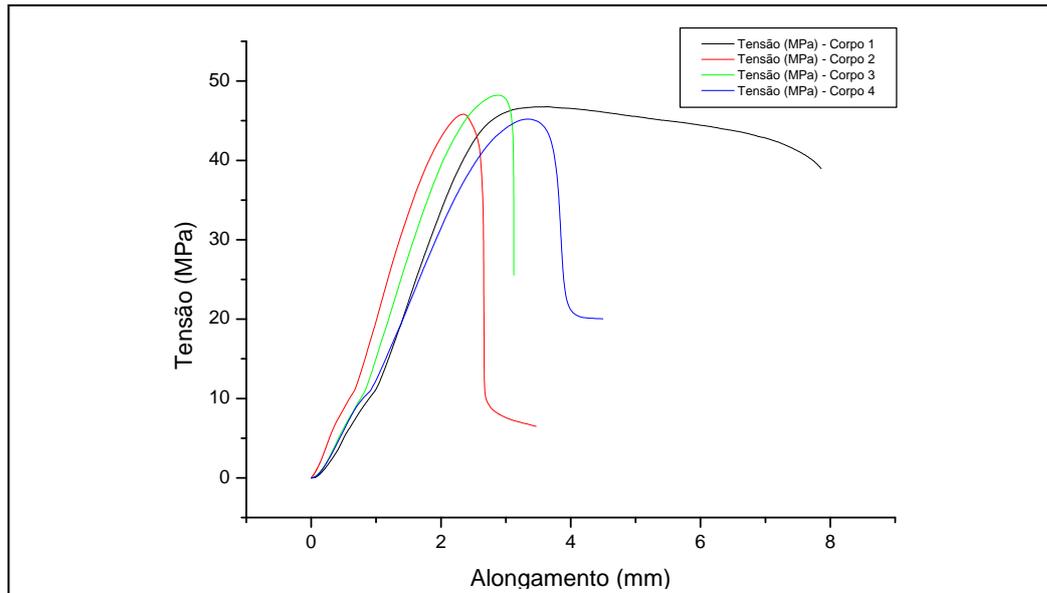


Figura 85 – Aspecto das curvas tensão (MPa) versus alongamento (mm) para as amostras do Material 3 – Ensaio de compressão paralela

A Figura 86 ilustra um corpo de prova de compressão paralela na máquina de ensaio universal.

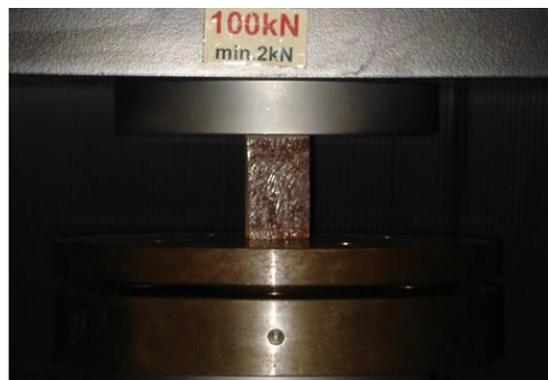


Figura 86 – Corpo de prova de compressão paralela na máquina de ensaio universal

Em alguns projetos, a grande exigência requerida é a resistência à compressão. Assim, o projetista deve especificar um material que apresente boa resistência à compressão, que não se deforme facilmente e que assegure boa precisão dimensional quando solicitado a esforços de compressão. As relações que se aplicam para o ensaio de tração também são válidas para o ensaio de

compressão. Isto significa que quando um corpo é submetido à compressão, ele sofrerá inicialmente uma deformação elástica e, a seguir uma deformação plástica. Assim, a lei de Hooke também é válida para a fase elástica de deformação no ensaio de compressão.

Segundo FLECK (1996) a resistência à compressão axial de um compósito normalmente é relativamente baixa, pois a maioria dos mecanismos individuais de falha por compressão é ditada pelas propriedades da matriz. Os fatores que condicionam o modo de ruptura em compressão ocorrem ao nível estrutural (geometria do corpo de prova), ao nível macroestrutural (ao nível da lâmina) e ao nível micro estrutural (nível da fibra, da matriz e da interface).

Um problema que sempre ocorre no ensaio de compressão é o atrito entre o corpo de prova e as placas da máquina de ensaio. Outro problema é a possível ocorrência de flambagem, isto é, encurvamento do corpo de prova devido ao efeito da instabilidade na compressão. A flambagem ocorre principalmente em corpos de prova de comprimento elevado em relação ao seu diâmetro (Figura 87).

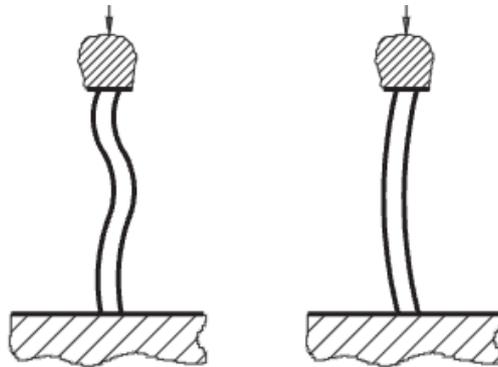


Figura 87 – Esquema de flambagem em corpos de prova sob compressão

Em estudos com compósitos de fibra de vidro e matrizes poliméricas, FLECK (1996) identificou que os principais mecanismos de falha por compressão são:

1. Micro flambagem elástica: é uma deformação por instabilidade e deforma a matriz por cisalhamento simples;

2. Micro flambagem plástica: deformação por instabilidade que ocorre em tensões suficientemente grandes para a matriz se deformar por cisalhamento de forma não-linear;
3. Esmagamento da fibra: a falha ocorre no nível da fibra devido a uma instabilidade ao cisalhamento, tais como flambagem no interior da fibra;
4. Fissuras/rachaduras: fissuras na matriz paralelas às fibras, estando associadas a uma baixa tenacidade da matriz;
5. Delaminação: está associada a uma baixa tenacidade da matriz;
6. Planos de cisalhamento: fratura em uma faixa orientada em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.

A Figura 88 ilustra algumas falhas sob compressão para compósitos de fibra de vidro e matrizes poliméricas presentes no estudo de FLECK (1996). Por serem falhas de um compósito fibroso, serão consideradas como parâmetros para se realizar uma correlação com as falhas ocorridas nos compósitos de fibra de ubuçu e resinas de mamona/epóxi. De fato, estudos de falhas por compressão em compósitos reforçados por fibras vegetais são bastante raros na literatura. Assim, esta pesquisa pretende contribuir, ainda que brevemente, com um estudo sobre os tipos de falhas ocorridas em cada material compósito pesquisado.

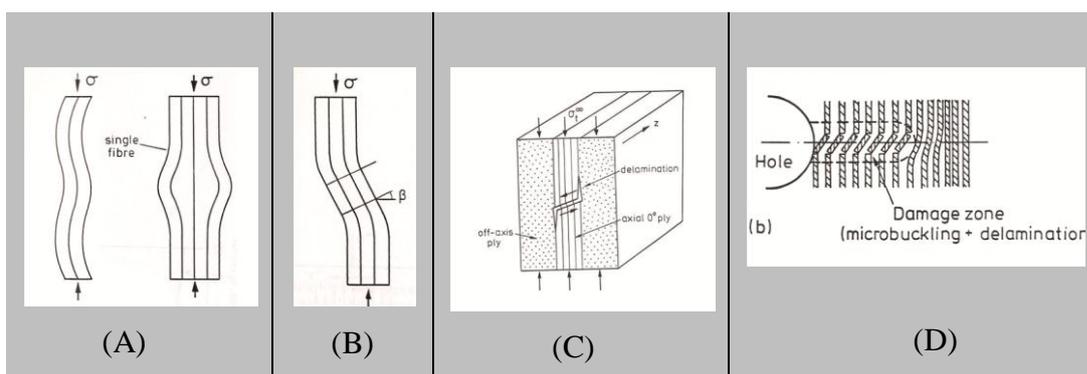
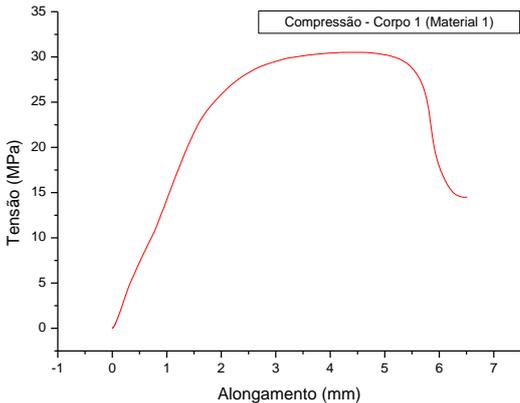


Figura 88 – Falhas sob compressão em compósitos fibrosos: (A) Flambagem; (B) Cisalhamento; (C) Delaminação; (D) Flambagem e delaminação.

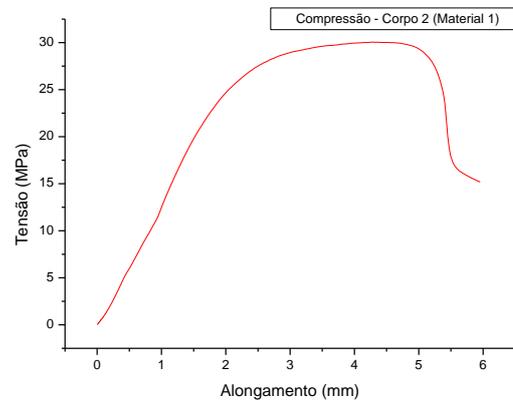
A flambagem é o mecanismo de falha mais encontrado na compressão axial, segundo FLECK (1996). Esta falha se deve, provavelmente, à instabilidade local das fibras na matriz. A instabilidade está relacionada à ondulação da fibra (na borda livre, em regiões ricas em resina e também numa interface fibra/matriz fraca). Nesta pesquisa a falha por flambagem foi identificada com maior frequência nos corpos de prova submetidos ao ensaio de compressão, seguida por delaminação e planos de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento. Para melhor visualizar o aspecto da ruptura nos corpos de prova após o ensaio de compressão paralela, encontram-se aqui ilustrados, lado a lado (Quadro 4), as amostras testadas e a aparência da curva tensão (MPa) versus alongamento (mm).

Quadro 4 - Amostras testadas e a aparência da curva tensão (MPa) versus alongamento (mm) – Compressão Paralela

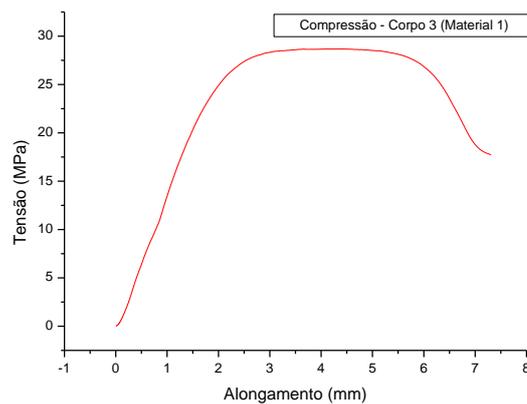
Corpo de Prova	Curva Tensão (MPa) versus Alongamento (mm)
 <p>Amostra 1 (Material 1) – Resistência à compressão de 29,5 MPa. Tipo de falha: Flambagem com micro trincas devido à rigidez da matriz, ou seja, falhas do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Planos de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.</p>	<p>Material 1: Fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 1:1 de seus componentes.</p>  <p>Compressão - Corpo 1 (Material 1)</p>



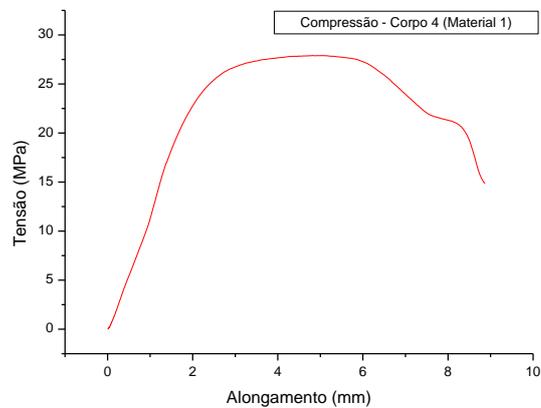
Amostra 2 (Material 1) – Resistência à compressão de 30,2 MPa. Tipo de falha: Flambagem com micro trincas devido à rigidez da matriz, ou seja, falhas do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Planos de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.



Amostra 3 (Material 1) - Resistência à compressão de 28,8 MPa. Tipo de falha: Flambagem com micro trincas devido à rigidez da matriz, ou seja, falhas do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Planos de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.



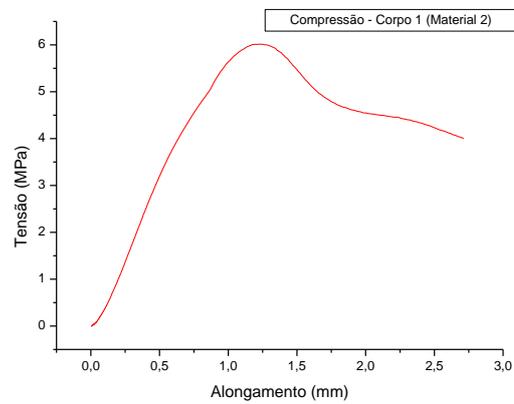
Amostra 4 (Material 1) - Resistência à compressão de 27,9 MPa. Tipo de falha: Flambagem com micro trincas devido à rigidez da matriz, ou seja, falhas do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Planos de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.



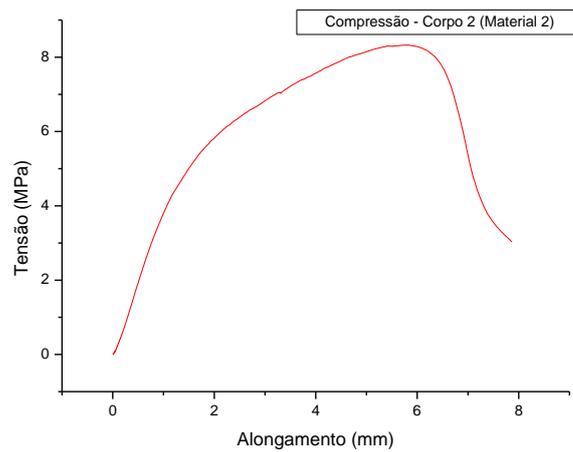


Amostra 1 (Material 2) - Resistência à compressão de 6,4 MPa. Tipo de falha: Flambagem do tipo elástica, ou seja, do tipo A (Figura 88), porém com muito menos danos que a encontrada nos Materiais 1 e 3.

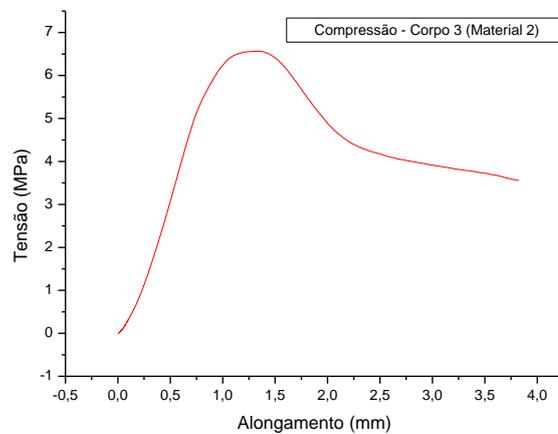
Material 2: Fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 2:1 de seus componentes.



Amostra 2 (Material 2) - Resistência à compressão de 9,1 MPa. Tipo de falha: Flambagem do tipo elástica, ou seja, do tipo A (Figura 88), porém com muito menos danos que a encontrada nos Materiais 1 e 3.

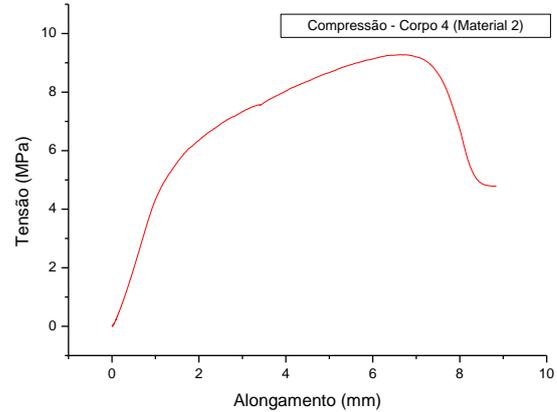


Amostra 3 (Material 2) - Resistência à compressão de 6,9 MPa. Tipo de falha: Flambagem do tipo elástica, ou seja, do tipo A (Figura 88), porém com muito menos danos que a encontrada nos Materiais 1 e 3.



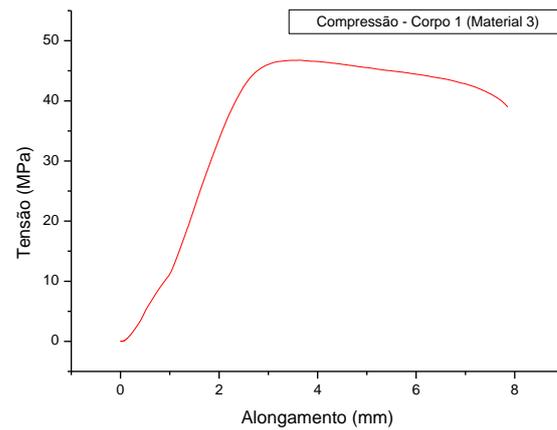


Amostra 4 (Material 2) - Resistência à compressão de 10,3 MPa. Tipo de falha: Flambagem do tipo elástica, ou seja, do tipo A (Figura 88), porém com muito menos danos que a encontrada nos Materiais 1 e 3.

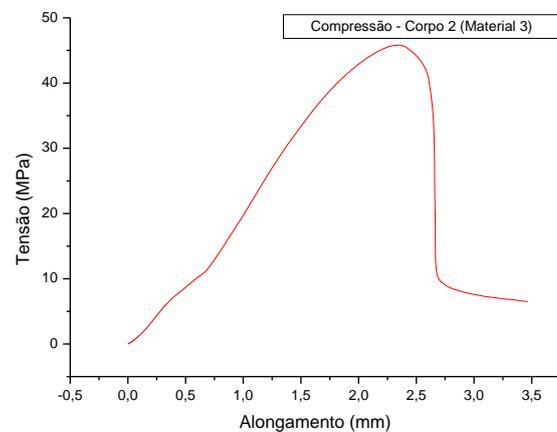


Amostra 1 (Material 3) - Resistência à compressão de 50,9 MPa. Tipo de falha: Flambagem com micro trincas devido à rigidez da matriz, falha do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89).

Material 3: Fibra de ubuçu e resina epóxi com formulação recomendada pelo fabricante.

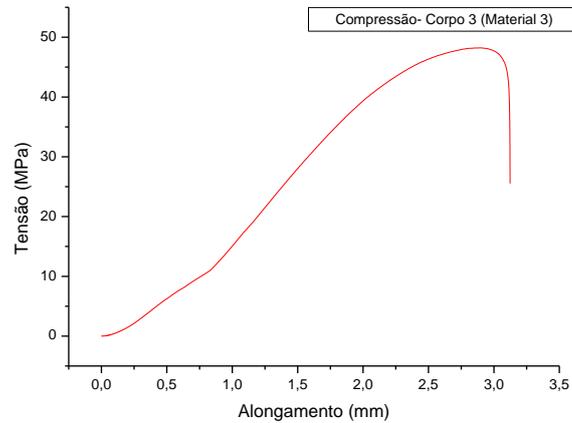


Amostra 2 (Material 3) - Resistência à compressão de 45,8 MPa. Tipo de falha: Flambagem com trincas e severas delaminações devido à rigidez da matriz. Falha do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Planos de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.

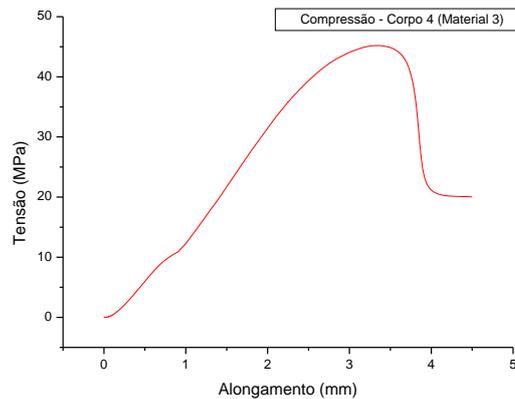




Amostra 3 (Material 3) - Resistência à compressão de 50,7 MPa. Tipo de falha: Flambagem com trincas e delaminações devido à rigidez da matriz. Falha do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Plano de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.



Amostra 4 (Material 3) - Resistência à compressão de 47,7 MPa. Tipo de falha: Flambagem com trincas devido à rigidez da matriz. Falha do tipo D, flambagem e delaminação (Figura 89). Plano de cisalhamento em torno de 45° em relação ao eixo de carregamento.



Para se ter uma noção mais clara do aspecto das falhas ocorridas em cada tipo de material, as amostras mais significativas de cada grupo estão mostradas na Figura 89. Pode-se observar que a falha do Material 2 é menos severa do que as dos Materiais 1 e 3, fato atribuído à flexibilidade da matriz. Concluindo-se, portanto, que quanto mais rígida a matriz, mais severas foram as falhas (Material 1 e 3). Dessa forma, o Material 3 apresentou falhas mais severas que os outros materiais, sendo este fato devido à natureza da matriz (epóxi) ser mais rígida que a resina de mamona.



Figura 89 – Falhas características de cada grupo de materiais: (A) Material 1; (B) Material 2; (C) Material 3

4.2.3 Ensaio de compressão normal

O ensaio de compressão normal às fibras também foi realizado apenas com os três materiais iniciais, ou seja, Material 1, 2 e 3. A Figura 90 apresenta os resultados de resistência à compressão para cada corpo de prova dos materiais analisados.

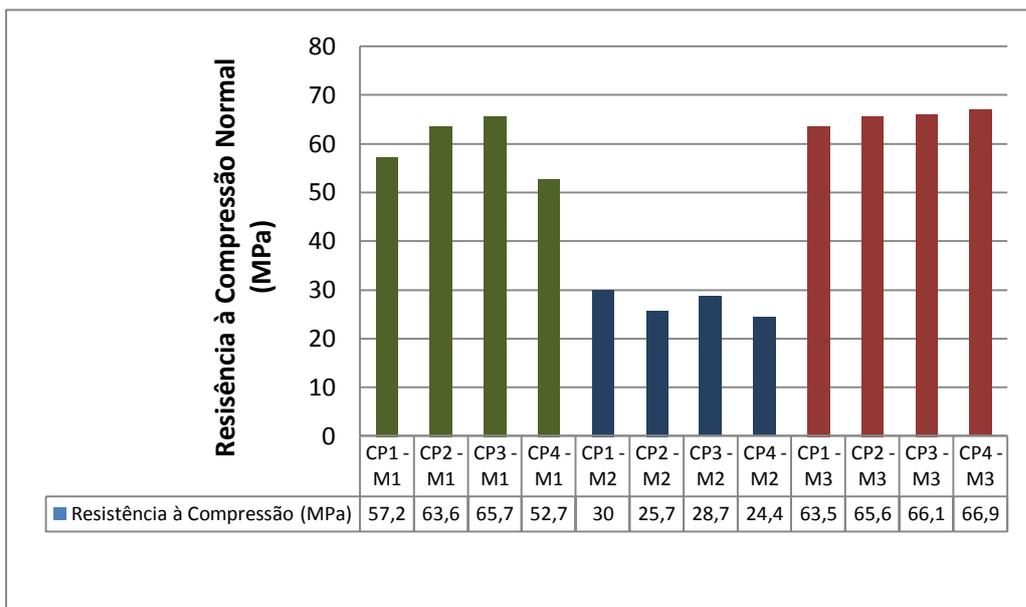


Figura 90 – Valores de resistência a compressão para cada corpo de prova dos materiais analisados

Na Figura 91 são apresentados os valores médios da resistência à compressão. Observa-se que a maior resistência foi apresentada pelas amostras do Material 3, ou seja, o compósito formado pela fibra de ubuçu e a resina epóxi, com média de $65,5 \pm 1,4$ MPa. A menor média ($27,3 \pm 2,6$ MPa) foi obtida pelo Material 2, ou seja, fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção de 2:1, provavelmente devido ao adesivo ser mais flexível nesta proporção. O Material 1 apresentou valores bem próximos ($59,8 \pm 5,9$ MPa) aos do Material 3.

Nesta pesquisa, o sentido de se fazer um ensaio de compressão normal é justamente o de tentar analisar a viabilidade técnica de aplicação dos compósitos ora apresentados na fabricação de pisos. Em se tratando de materiais alternativos para pisos, o bambu é bastante utilizado atualmente, e, por este motivo, optou-se por comparar as propriedades desse material com os dados obtidos para os compósitos desta pesquisa.

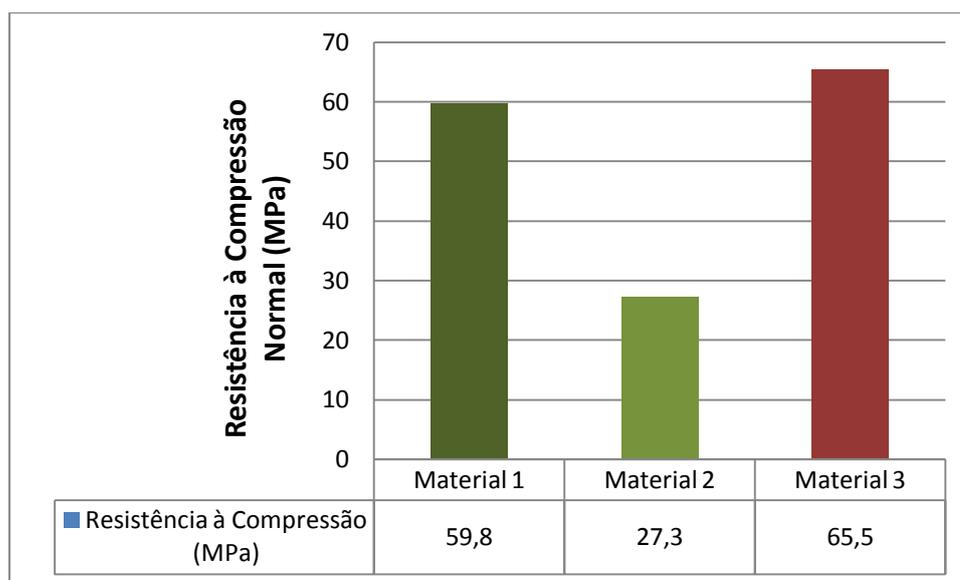


Figura 91 – Valores médios de resistência à compressão para os três materiais analisados

Os resultados do ensaio de resistência à compressão normal foram maiores que os encontrados para o ensaio de resistência à compressão paralela. Isso é esperado, já que o compósito no sentido vertical tende a exigir mais propriedades de resistência da matriz na linha de cola, o que pode diminuir consideravelmente os valores de resistência, como foi o caso nesta pesquisa.

Os resultados obtidos foram superiores aos encontrados por OLIVEIRA (2005) para o compósito formado por lâminas de bambu e resina fenólica (17,3 MPa) e aos encontrados por GONÇALVES et al., (2002), que obtiveram 18 MPa para o compósito de bambu e resina fenólica. Desta forma, o valor de resistência à compressão obtido para o Material 1 (59,8 MPa) é considerado aceitável para aplicação do material na fabricação de pisos residenciais.

Para efeito de comparação com madeiras comumente utilizadas para fabricação de pisos residenciais, temos os valores de resistência à compressão encontrados por CALIL JÚNIOR et al., (2000) para a madeira de jatobá (91 MPa) e maçaranduba (83 MPa).

As Figuras 92, 93 e 94 ilustram os comportamentos das curvas de tensão (MPa) versus alongamento (mm) dos corpos de prova de compressão para cada material analisado. Pode-se observar que os 4 exemplares de cada material apresentaram comportamentos uniformes, tanto no que diz respeito aos parâmetros quantitativos quanto no aspecto das curvas força versus deslocamento.

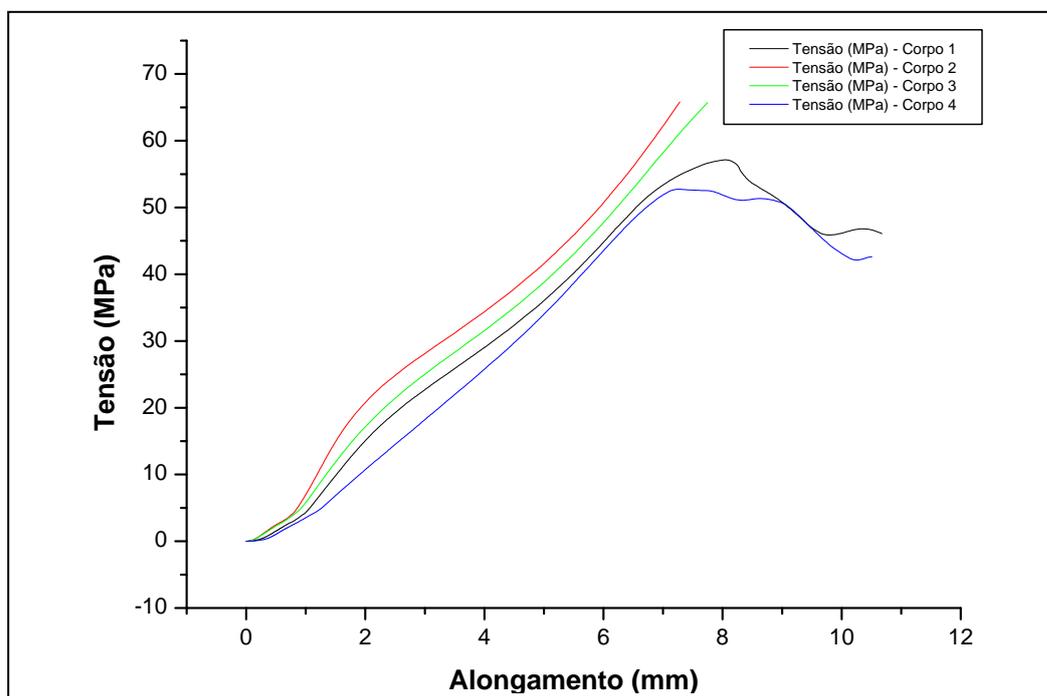


Figura 92 – Aspecto das curvas tensão (MPa) versus alongamento (mm) para as amostras do Material 1 – ensaio de compressão normal

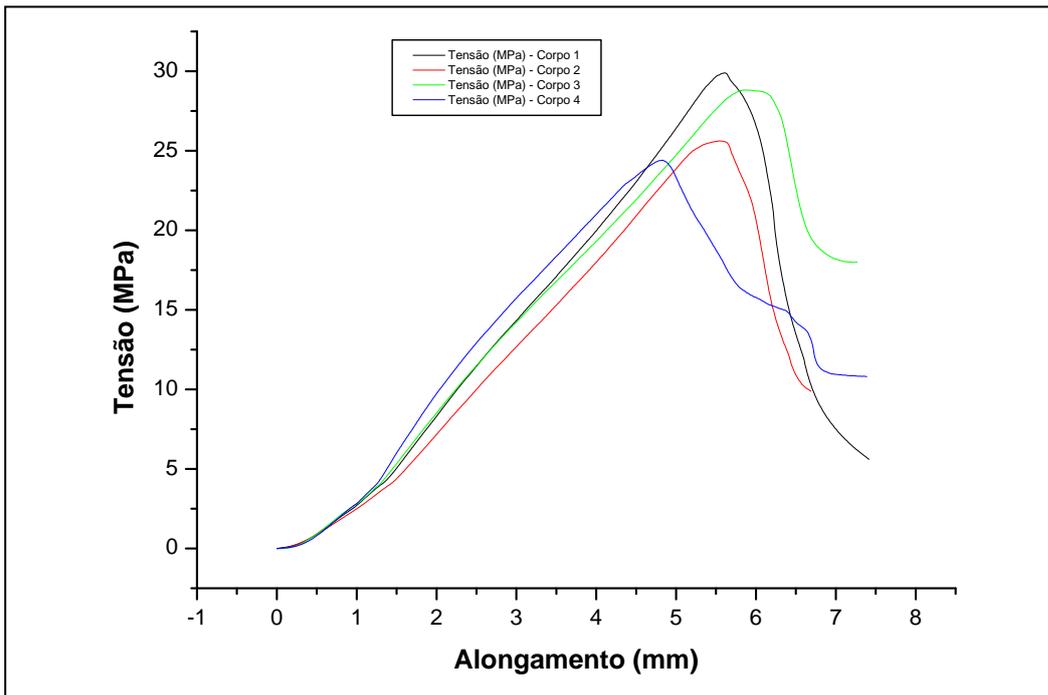


Figura 93 – Aspecto das curvas tensão (MPa) versus alongamento (mm) para as amostras do Material 2 – Ensaio de compressão normal

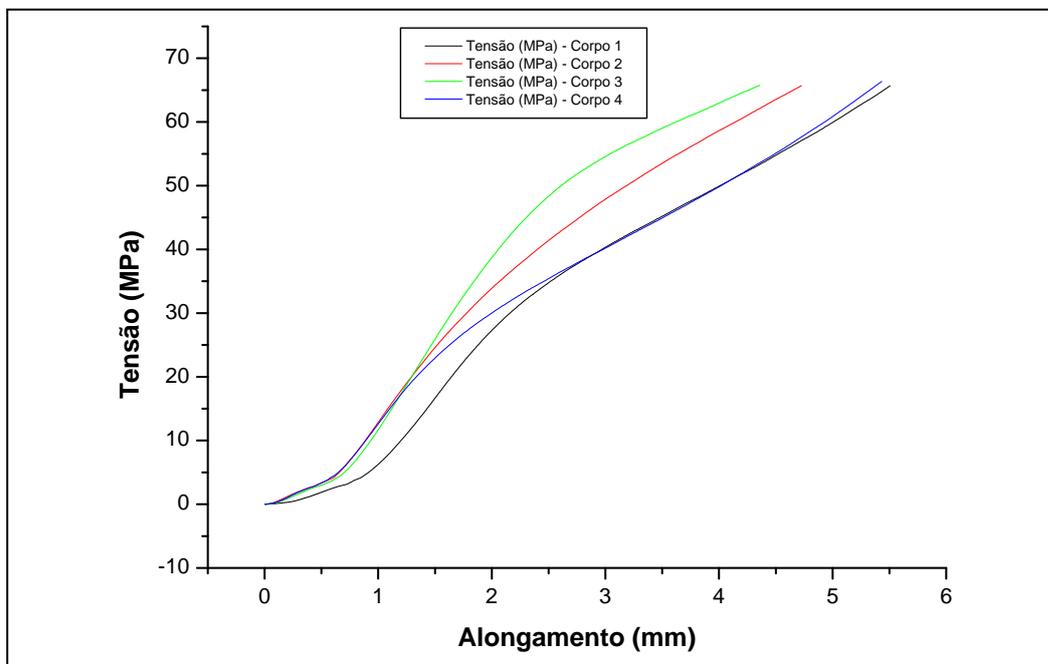


Figura 94 – Aspecto das curvas tensão (MPa) versus alongamento (mm) para as amostras do Material 3 – Ensaio de compressão normal

A Figura 95 ilustra três momentos do ensaio de compressão na máquina de ensaio universal.

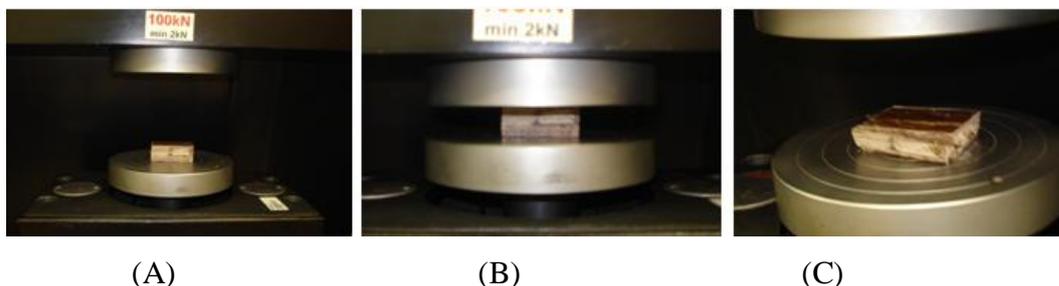


Figura 95 – (A) Corpo de prova nos discos de compressão; (B) corpo de prova sendo comprimido e (C) corpo de prova comprimido

De acordo com PICANÇO (2005), a resistência à compressão do compósito é influenciada pelo tipo, comprimento e fração volumétrica das fibras. Durante um ensaio de compressão de compósitos de argamassa reforçada com fibra vegetal, é comum que o corpo-de-prova, já rompido, mantenha suas partes unidas pelas fibras, não perdendo, assim, sua continuidade e evitando sua fratura catastrófica. Isso vem reafirmar o papel das fibras como elementos capazes de ligar as faces das fissuras, conferindo ao material certa capacidade, mesmo que mínima, de carregamento, após a fissuração da matriz.

De fato, no ensaio de compressão normal realizado nesta pesquisa, alguns corpos de prova mesmo já tendo sido rompidos, apresentavam resistência para evitar uma fratura catastrófica. Alguns corpos de prova dos Materiais 1 e 3 não romperam na capacidade máxima da máquina de ensaio universal (aproximadamente 68 MPa), dessa forma, o ensaio terminava quando a amostra alcançava a resistência limite do equipamento sem romper.

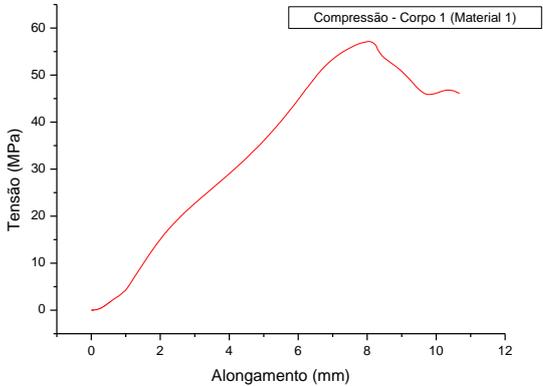
Para melhor visualizar o aspecto da ruptura nos corpos de prova após o ensaio de compressão, encontram-se aqui ilustrados, lado a lado (Quadro 5), as amostras testadas e a aparência da curva tensão (MPa) versus alongamento (mm).

Com relação aos resultados obtidos para o ensaio de compressão normal, que neste caso se traduz em importante requisito para uso em pisos tanto residenciais quanto comerciais, é possível concluir que dentre os compósitos analisados, o Material 3 apresentou o melhor comportamento (média de

resistência à compressão de 65,5 MPa), já que seus corpos de prova apresentaram resistência superior a capacidade máxima da máquina de ensaio. Em seguida encontra-se o Material 1 (média de resistência à compressão de 59,8 MPa), o qual apresentou dois corpos de prova que tiveram resistência superior a capacidade máxima da máquina de ensaio. O Material 2 se apresentou como o menos resistente dos três materiais (média de resistência à compressão de 27,3 MPa), porém esse resultado ainda foi superior ao encontrado por OLIVEIRA (2005) para o compósito formado por lâminas de bambu e resina fenólica (17,3 MPa), como exposto anteriormente e este material também foi projetado para ser utilizado em piso. O resultado de resistência à compressão, obtido para o Material 2 se deve possivelmente a formulação da resina de mamona (2:1), que nesta proporção é bem mais flexível que a proporção 1:1 de seus componentes.

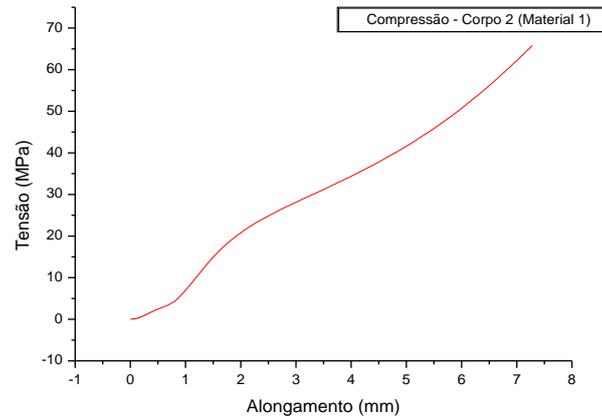
Assim, é possível concluir previamente que os Materiais 1 e 3 se mostraram eficientes e adequados para fabricação de pisos de residências e de escritórios, pois como citam SILVA & BITTENCOURT (2002), estes ambientes estão sujeitos a pequeno desgaste se comparados com os ambientes industriais, onde as condições de uso são mais severas.

Quadro 5 – Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de compressão e curvas de tensão (MPa) versus deformação (mm)

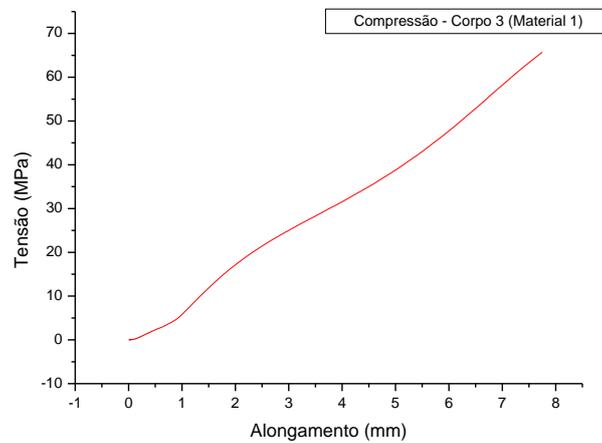
Corpo de Prova	Curva Tensão (MPa) versus Deformação (mm)
 <p>Amostra 1 (Material 1) – Resistência à compressão de 57,2 MPa. Com o carregamento houve ruptura. Inicialmente houve uma flambagem seguida por ruptura que formou um ângulo de 45° em relação à superfície de carregamento.</p>	<p>Material 1: Fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 1:1 de seus componentes.</p>  <p>Compressão - Corpo 1 (Material 1)</p>



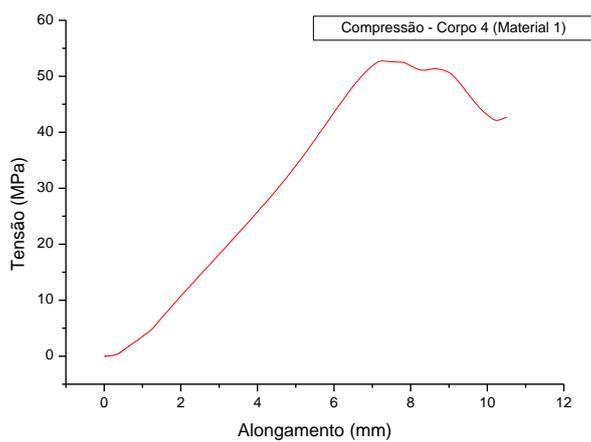
Amostra 2 (Material 1) - Resistência à compressão de 63,6 MPa. Não houve flambagem nem ruptura, mas sim, uma diminuição na espessura de aproximadamente 3 mm. O ensaio foi terminado quando o corpo de prova apresentou resistência superior à capacidade máxima da máquina.



Amostra 3 (Material 1) - Resistência à compressão de 65,7 MPa. Houve uma ligeira flambagem, mas sem ruptura. Houve diminuição na espessura de aproximadamente 3,5 mm. O ensaio foi terminado quando o corpo de prova apresentou resistência superior à capacidade máxima da máquina.



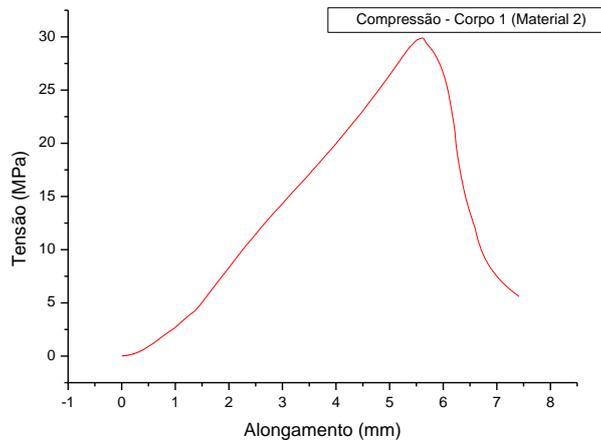
Amostra 4 (Material 1) - Resistência à compressão de 52,7 MPa. Com o carregamento houve ruptura. Inicialmente houve uma flambagem seguida por ruptura que formou um ângulo de 45° em relação à superfície de carregamento.



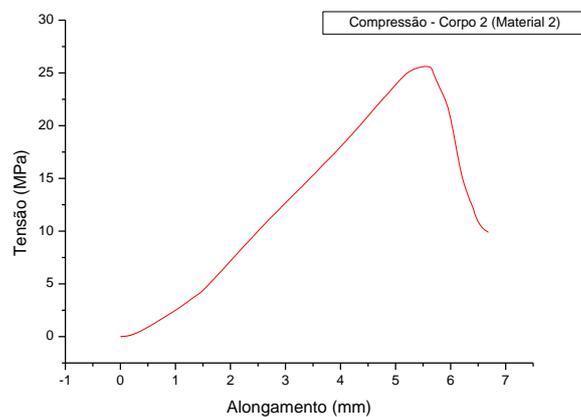


Amostra 1 (Material 2) – Resistência à compressão de 30 MPa. Inicialmente houve uma flambagem seguida por ruptura que ocasionou o deslocamento das placas de material colado.

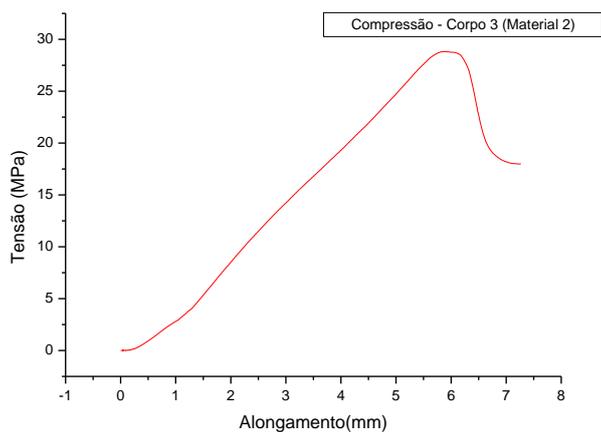
Material 2: Fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 2:1 de seus componentes.



Amostra 2 (Material 2) – Resistência à compressão de 25,7 MPa. Inicialmente houve uma flambagem seguida por ruptura que ocasionou o deslocamento das placas de material colado.

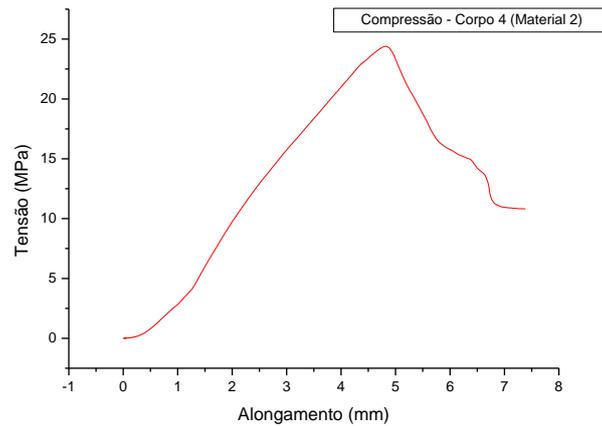


Amostra 3 (Material 2) – Resistência à compressão de 28,7 MPa. Inicialmente houve uma flambagem seguida por ruptura que ocasionou o deslocamento das placas de material colado.



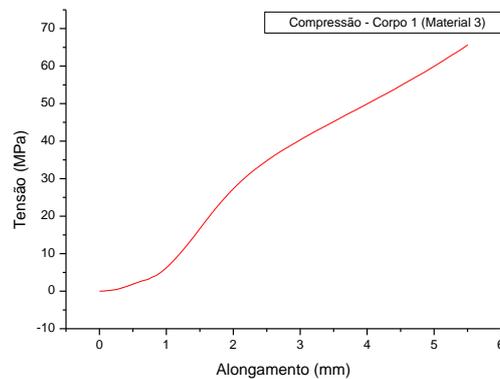


Amostra 4 (Material 2) – Resistência à compressão de 24,4 MPa. Inicialmente houve uma flambagem seguida por ruptura que ocasionou o deslocamento das placas de material colado.

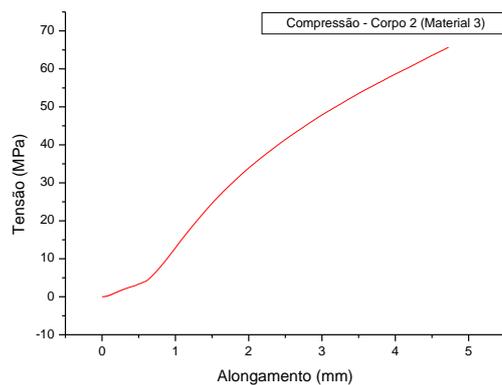


Amostra 1 (Material 3) – Resistência à compressão de 63,5 MPa. Não houve flambagem nem ruptura, mas sim, uma diminuição na espessura de aproximadamente 3 mm. O ensaio foi terminado quando o corpo de prova apresentou resistência superior à capacidade máxima da máquina.

Material 3: Fibra de ubuçu e resina epóxi com formulação recomendada pelo fabricante.

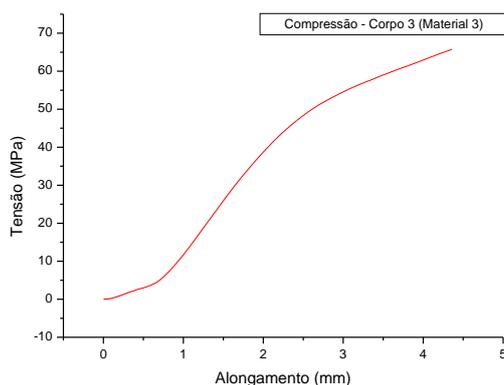


Amostra 2 (Material 3) – Resistência à compressão de 65,6 MPa. Não houve flambagem nem ruptura, mas sim, uma diminuição na espessura de aproximadamente 3 mm. O ensaio foi terminado quando o corpo de prova apresentou resistência superior à capacidade máxima da máquina.

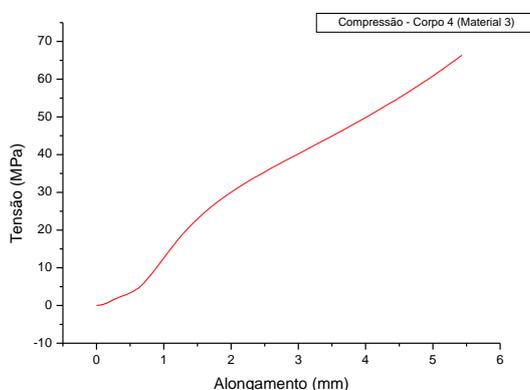




Amostra 3 (Material 3) – Resistência à compressão de 66 MPa. Não houve flambagem nem ruptura, mas sim, uma diminuição na espessura de aproximadamente 3,5 mm. O ensaio foi terminado quando o corpo de prova apresentou resistência superior à capacidade máxima da máquina.



Amostra 4 (Material 3) – Resistência à compressão de 66,9 MPa. Não houve flambagem nem ruptura, mas sim, uma diminuição na espessura de aproximadamente 3,3 mm. O ensaio foi terminado quando o corpo de prova apresentou resistência superior à capacidade máxima da máquina.



4.2.4 Ensaio de impacto

Segundo SILVA (2003), a caracterização das propriedades mecânicas dos materiais compósitos não é uma tarefa simples. A primeira questão que surge é como aplicar os métodos padrões, desenvolvidos para materiais homogêneos, aos materiais compósitos. Este é especialmente o caso das propriedades locais, como os parâmetros de resistência ao impacto e tenacidade à fratura (BURZIC et al., 2001).

O comportamento referente ao impacto de compósitos reforçados com fibras depende de muitos fatores incluindo a natureza de seus constituintes, interface fibra/matriz, a construção e geometria dos compósitos, assim como das condições de teste. A fratura do corpo de prova ocorre em decorrência de fatores como fratura da matriz, descolamento fibra/matriz e arrancamento da fibra, denominado

“pull-out”. Destes, o mecanismo de “pull-out” pode ser destacado por ser um importante mecanismo de concentração/dissipação de energia no compósito reforçado com fibras (RAZERA, 2006).

De acordo com ANDERSON (1995) e TITA (2002), os principais mecanismos de falha dos materiais compósitos que podem ser observados durante os ensaios de impacto estão mostrados esquematicamente na Figura 96.

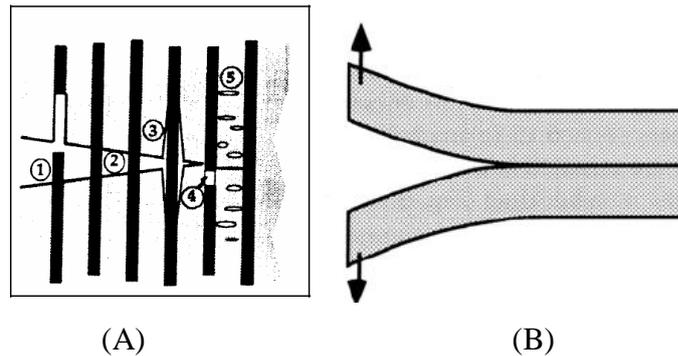


Figura 96 – Mecanismos de falha em compósitos (A): (1) “pull-out”; (2) deslizamento (ou ancoramento) da fibra (“fibra bridging”); (3) descolamento (“debonding”); (4) falha da fibra e (5) falha da matriz; (B) Delaminação (ANDERSON, 1995); (TITA, 2002)

No mecanismo (1), conhecido por “pull-out”, ocorre o arrancamento da fibra de dentro da matriz geralmente após a propagação da trinca, ou seja, logo após a ocorrência do mecanismo (2) que é conhecido por “fiber bridging” e, na maioria dos casos, encontra-se em compósitos poliméricos reforçados com fibras frágeis, matrizes dúcteis e interface envolvendo interações intensas. Desta maneira, a trinca se propaga pela matriz e a fibra forma uma ponte interligando as duas superfícies da matriz fraturada. Por outro lado, a ponta da trinca dá origem a regiões com concentração de tensão até mesmo fora do plano de propagação da mesma. Estas tensões podem provocar o “debonding” (3) que se caracteriza pelo descolamento entre a fibra e a matriz, devido à presença de uma interface fraca. Este mecanismo conduz ao rompimento da interação existente entre a fibra e a matriz. Essa região na qual se concentram tensões, poderá também levar à falha da fibra (4) devido a sua alta fragilidade, ou até a falha da matriz (5) pelo mesmo motivo (ANDERSON, 1995); (TITA, 2002).

NAGLIS & D'ALMEIDA (1998) nos falam que qualquer que seja a aplicação pretendida, estrutura ou componentes estão sujeitos a esforços estáticos e/ou dinâmicos que podem resultar em danos que levem o material a falhas prematuras. O carregamento dinâmico, ou por impacto, tem particular importância de ser analisado, pois, sob elevadas taxas de deformação, a fratura do material pode ocorrer de modo preferencialmente frágil.

Na análise dos resultados dos ensaios de impacto do tipo “queda de dardo”, a resistência ao impacto foi quantificada em termos da energia de impacto absorvida por unidade de espessura do corpo de prova na região de ruptura.

A Figura 97 ilustra as curvas força (N) versus deslocamento (mm), obtidas para o Material 1 no ensaio de impacto (do tipo “queda de dardo”). É possível observar que as amostras apresentaram um comportamento uniforme, com uma resistência ao impacto entre 1343 N (amostra 5) e 1800 N (amostras 1 e 6). A Figura 98 ilustra a resistência ao impacto obtida para cada amostra do Material 1.

As amostras do Material 1 apresentaram as seguintes resistências máximas ao impacto, a saber: Amostra 1 (1801,1 N); Amostra 2 (1434,8 N); Amostra 3 (1379,5 N); Amostra 4 (1554,3 N); Amostra 5 (1343,8 N) e Amostra 6 (1873,6 N). A média de resistência ao impacto para o Material 1 foi de $1566 \pm 225,7$ N. Este valor foi superior ao encontrado por MEGIATTO JÚNIOR (2006) em ensaio de impacto do tipo Izod para os compósitos de matriz fenólica reforçados com fibras de sisal não tratada, da ordem de 443 J/m (400 N).

A resistência ao impacto para o Material 1 foi superior também ao encontrado por RAZERA (2006), que em ensaio de impacto Izod para os compósitos híbridos de matriz fenólica, fibras de algodão e juta (tecido) encontrou um valor de 92,7 N (92,7 J/m). Para o compósito de lignina e fibras de coco obteve-se uma resistência ao impacto de 643,8 N (643,8 J/m) e para o compósito de lignina e fibras de bananeira obteve-se uma resistência ao impacto de 159 N (159 J/m) (RAZERA, 2006). Faz-se necessário explicar que o ensaio de impacto do tipo Izod é diferente do ensaio de impacto do tipo queda de dardo. Porém, na literatura não foram encontrados trabalhos que tenham realizado o ensaio de impacto do tipo queda de dardo com materiais compósitos da natureza dos pesquisados aqui para serem comparados.

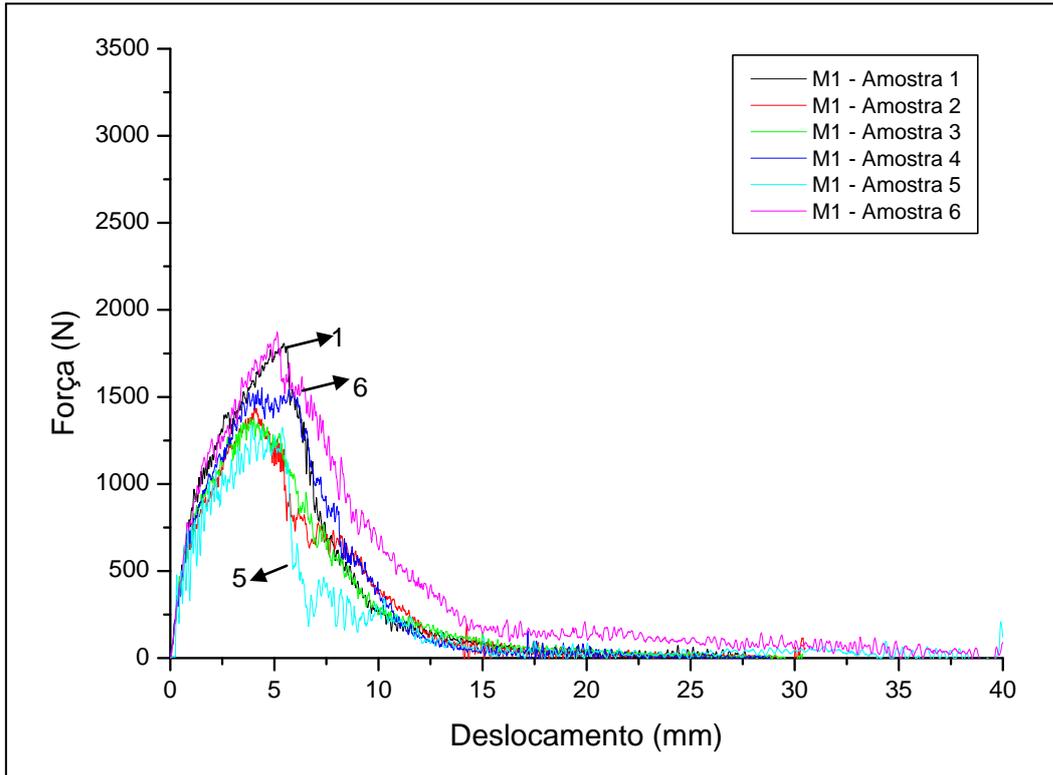


Figura 97 – Curvas força (N) versus deslocamento (mm) para o Material 1

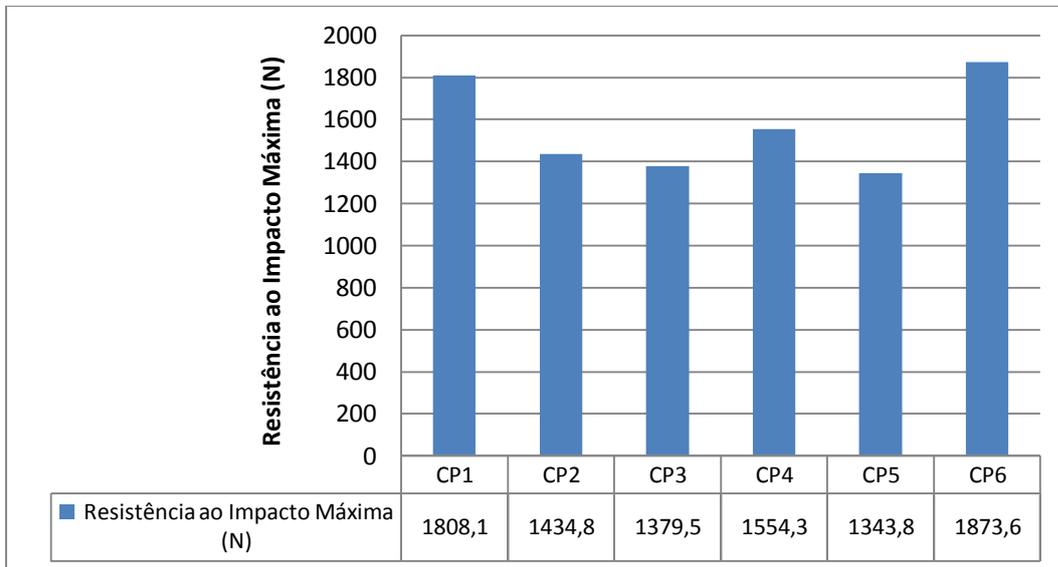


Figura 98 – Resistência ao impacto máxima para amostras do Material

SILVA (2003) realizou um ensaio de tenacidade à fratura com duas velocidades de carregamento (0,5 e 1 mm/min) para a resina de poliuretano a base de óleo de mamona e obteve os valores de 275 N e 250 N, respectivamente. Desses dados pode-se concluir que a fibra de ubuçu com a resina de mamona na proporção 1:1 de seus componentes apresentou uma excelente resistência ao impacto.

O Quadro 6 ilustra as imagens das fraturas dos corpos de prova após o ensaio de impacto. As fotos foram tiradas da superfície inferior da amostra. Observando as imagens do Quadro 6 é possível afirmar que o dardo de metal conseguiu atravessar o Material 1, fraturando todas as amostras. O tipo de fratura ocorrida nas amostras pode ser considerado do tipo frágil. Os mecanismos de falha foram fratura da fibra/matriz e delaminação, como será apresentado no item 4.2.5.

A Figura 99 ilustra as curvas força (N) versus deslocamento (mm), obtidas para o Material 2 no ensaio de impacto (do tipo “queda de dardo”). É possível observar que as amostras apresentaram um comportamento uniforme, com uma resistência ao impacto entre 1723 N (amostra 2) e 3160 N (amostras 5 e 6).

A Figura 100 ilustra a resistência ao impacto máxima obtida para cada amostra do Material 2. As amostras do Material 2 apresentaram as seguintes resistências máximas ao impacto, a saber: Amostra 1 (2307,8 N); Amostra 2 (1723,4 N); Amostra 3 (2135,5 N); Amostra 4 (2651,1 N); Amostra 5 (3172,8 N) e Amostra 6 (3160 N). Os valores variaram de 591 N (amostra 2) a 1479 N (amostra 6). A média de resistência ao impacto para o Material 2 foi de $2525,2 \pm 579,8$ N. Este valor foi superior a média encontrada para o Material 1 (1566 N). Isso é resultado do Material 2 ser de natureza dúctil, pois a proporção de mistura da resina em 2:1 a deixa mais flexível e resistente ao impacto que a proporção da resina em 1:1 do Material 1.

Quadro 6 – Imagens das fraturas de cada corpo de prova do Material 1 após o ensaio de resistência ao impacto

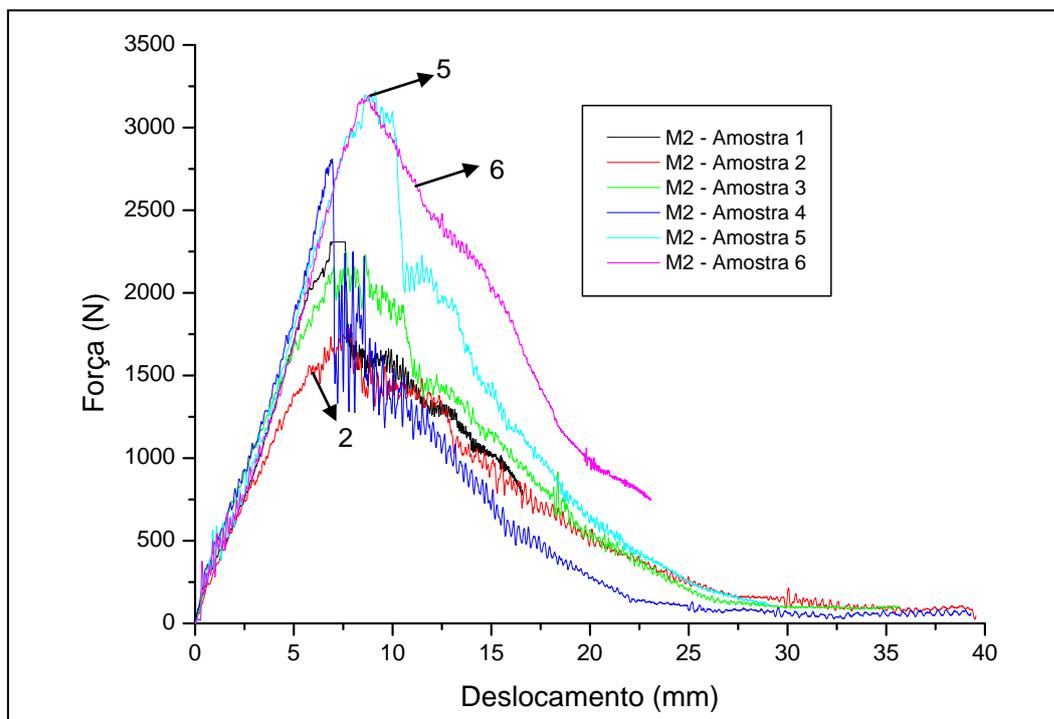
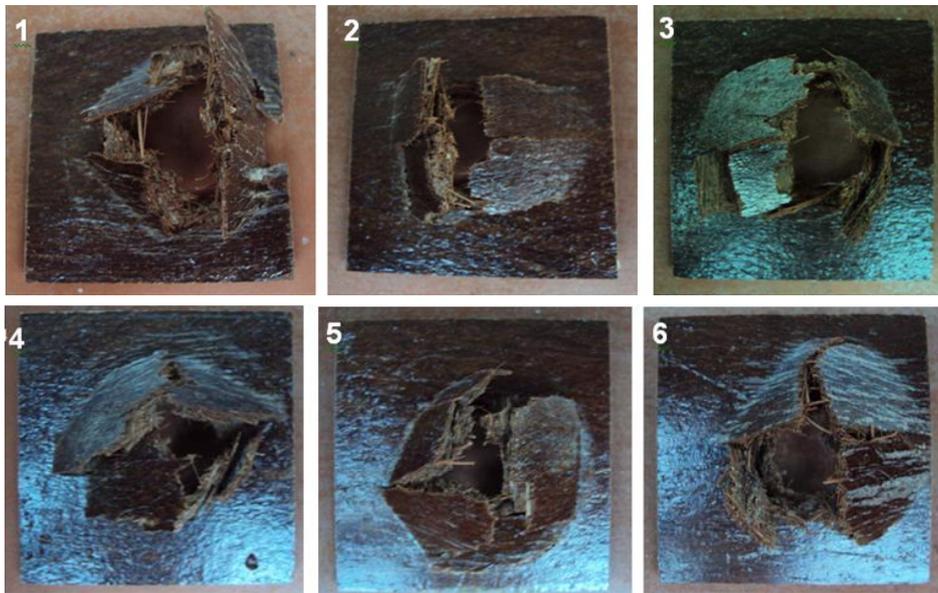


Figura 99 – Curvas força (N) versus deslocamento (mm) para o Material 2

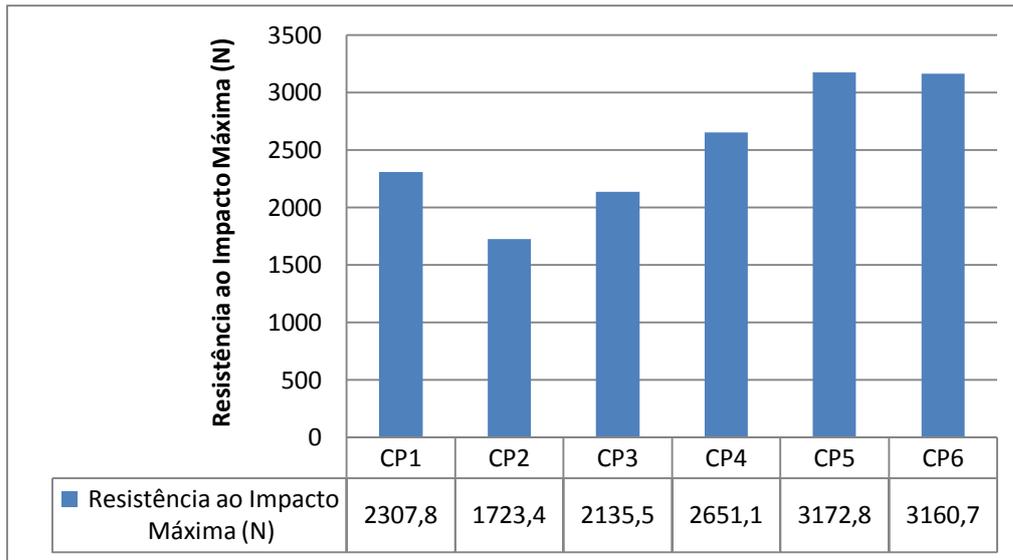
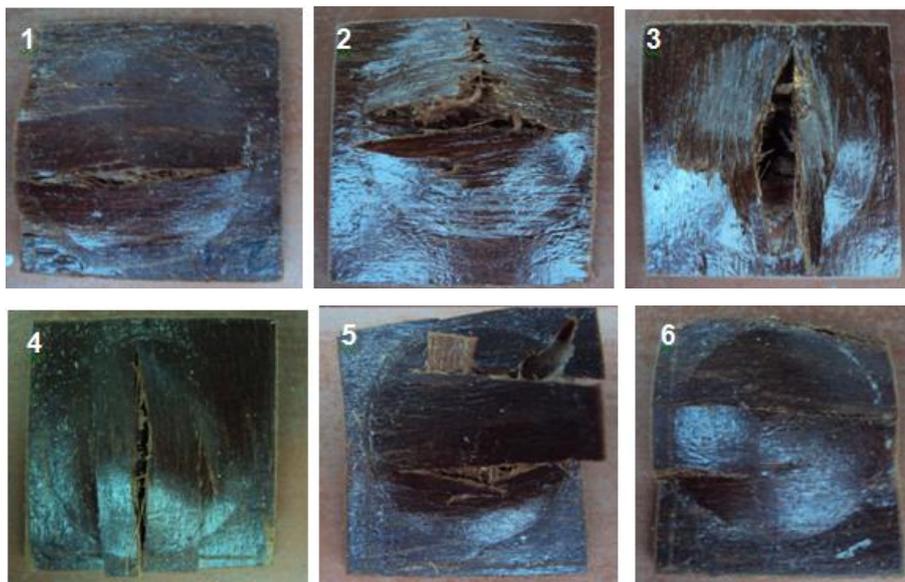


Figura 100 – Médias de resistência ao impacto para o Material 2

O Quadro 7 ilustra as imagens das fraturas dos corpos de prova após o ensaio de impacto do Material 2. As fotos foram novamente tiradas da superfície inferior da amostra. Primeiramente o tipo de fratura ocorrida nas amostras pode ser considerado do tipo semi-dúctil. Os mecanismos de falha foram fratura no sentido preferencial da fibra, fratura fibra/matriz.

Quadro 7 - Imagens das fraturas de cada corpo de prova do Material 2 após o ensaio de resistência ao impacto



Comparando as imagens dos Quadros 6 e 7 é possível observar que as fraturas ocorridas no Material 1 foram muito mais severas que as ocorridas no Material 2, sendo este último mais resistente ao impacto, apresentando um comportamento mais dúctil (fratura do tipo semi-dúctil) quando comparado com o Material 1. O dardo metálico conseguiu atravessar (embora com menor severidade que no Material 1), três amostras, a saber: 2, 3 e 5. Esse comportamento dúctil do Material 2 deve estar diretamente relacionado com a questão da resina de mamona (proporção 2:1) que faz com que a mesma apresente um comportamento mais flexível, maleável, que a proporção da resina 1:1 (rígida), visto que a geometria e quantidade de fibras utilizadas nos dois compósitos foi a mesma.

A Figura 101 ilustra as curvas força (N) versus deslocamento (mm), obtidas para o Material 3 no ensaio de impacto (do tipo “queda de dardo”). É possível observar que, novamente, as amostras apresentaram um comportamento uniforme, com uma resistência ao impacto entre 2362 N (amostra 1) e 2943 N (amostra 3).

A Figura 102 ilustra a resistência ao impacto máxima obtida para cada amostra do Material 3, a saber: Amostra 1 (2362,9 N); Amostra 2 (2829,8 N); Amostra 3 (2943,5 N); Amostra 4 (2486,7 N). Os valores variaram de 2362,9 N (amostra 1) a 2943,5 N (amostra 3). A média de resistência ao impacto para o Material 3 foi de $2655,7 \pm 275,3$ N. Este valor foi superior ao encontrado para a média de resistência do Material 1 (1565,6 N). Realizando uma análise estatística comparativa entre os materiais 2 e 3, o t-Test (Software Microcal Origin) apresentou que as duas médias de resistência ao impacto desses materiais são estatisticamente diferentes, ou seja, o Material 2 é estatisticamente diferente do Material 3. Diante disto, é preciso frisar que duas amostras do Material 2 alcançaram valores maiores de resistência máxima ao impacto (amostras 5 e 6).

O Quadro 8 ilustra as imagens das fraturas dos corpos de prova após o ensaio de impacto. O dardo metálico conseguiu atravessar todas as amostras do Material 3, comprovando a natureza mais frágil deste material se comparado com o Material 2. As fotos mais uma vez foram tiradas da superfície inferior da amostra e o tipo de fratura ocorrida nas amostras pode ser considerado do tipo frágil. Os mecanismos de falha foram fratura da fibra/matriz e delaminação, semelhante ao que aconteceu com o Material 1.

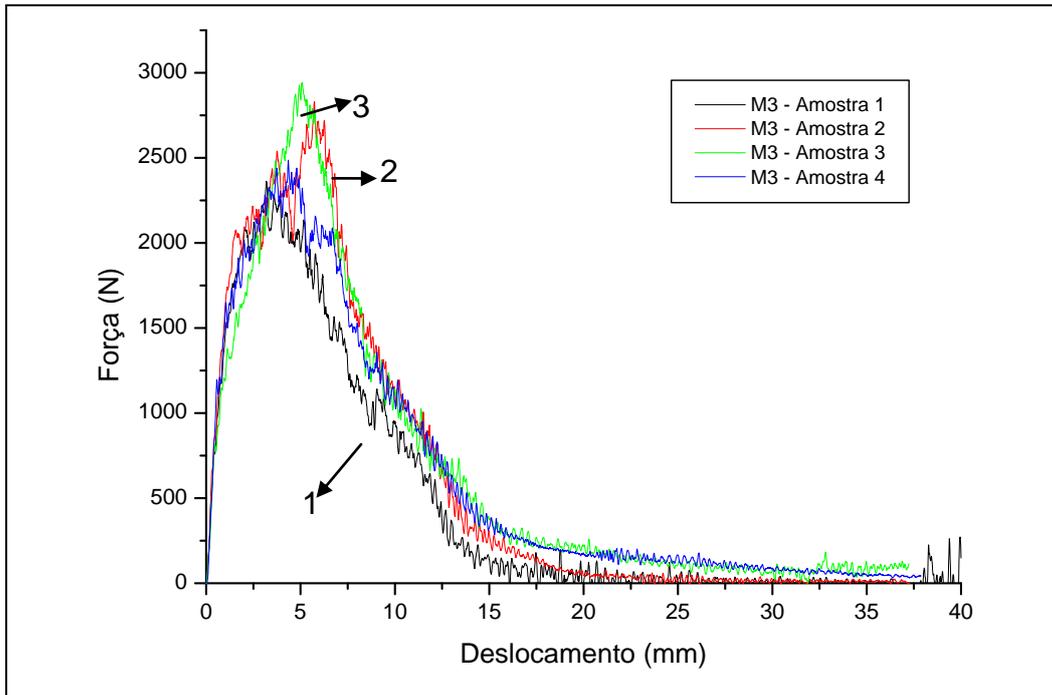


Figura 101 – Curvas força (N) versus deslocamento (mm) para o Material 3

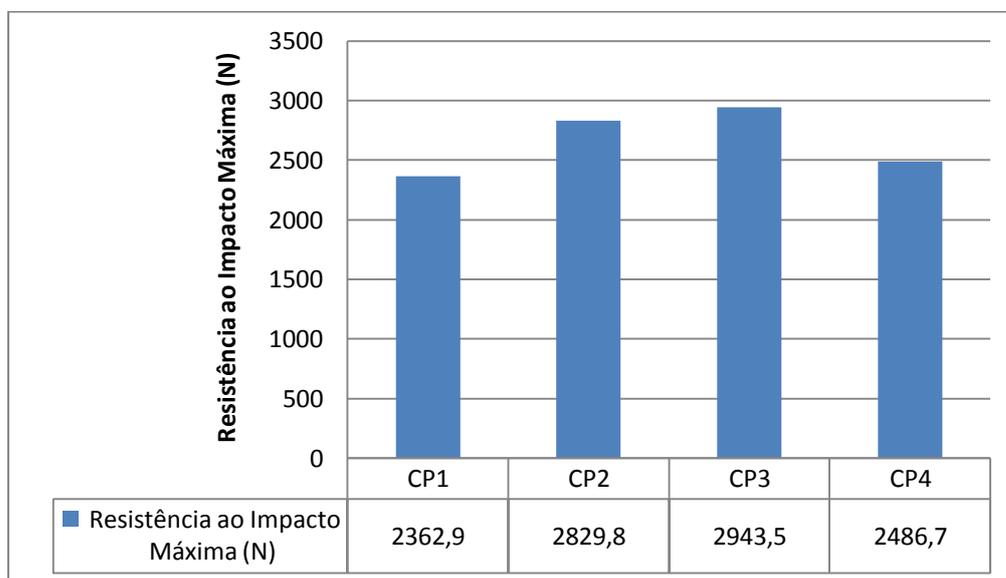
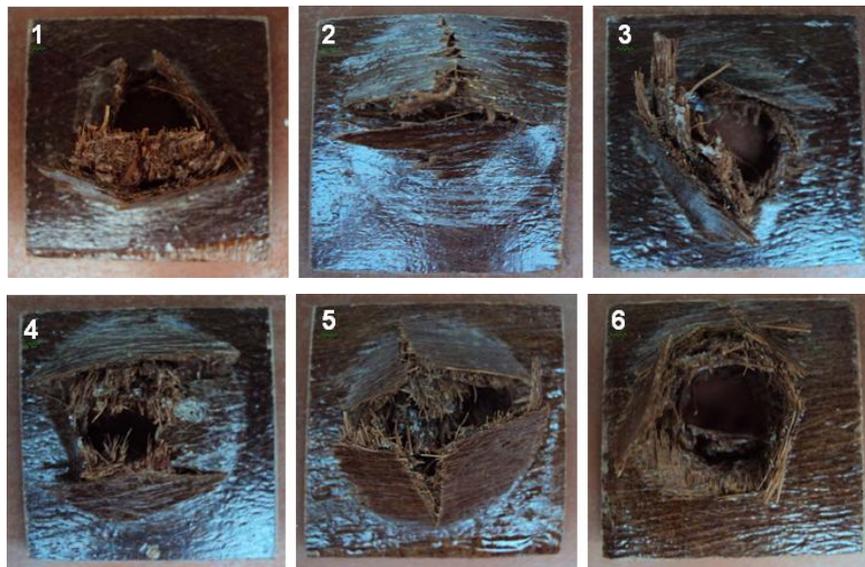


Figura 102 – Médias de resistência ao impacto para o Material 3

Comparando as imagens dos Quadros 6, 7 e 8 é possível observar que as fraturas ocorridas no Material 1 e 3 foram muito mais severas que as ocorridas no

Material 2, sendo que este último apresentou um comportamento mais dúctil quando comparado com os Materiais 1 e 3.

Quadro 8 - Imagens das fraturas de cada corpo de prova do Material 3 após o ensaio de resistência ao impacto



A Figura 103 ilustra as médias totais de resistência ao impacto (N) para os três materiais analisados neste ensaio. É possível observar que o Material 2 se mostrou tão resistente ao impacto quanto o material 3. O que demonstra mais uma vez a natureza semi-dúctil do compósito formado pela fibra de ubuçu e resina de mamona na proporção 2:1 de seus componentes. Neste ensaio, o material totalmente ecológico (Material 2) se saiu tão bem quanto o Material 3 (onde a resina epóxi é oriunda de fontes petrolíferas) e algumas de suas amostras foram mais resistentes ao impacto que as do Material 3.

A Figura 104 apresenta uma análise quantitativa das curvas até então apresentadas. Os valores de força foram divididos pela espessura da amostra, de forma a ter em conta a geometria da mesma. É possível observar que a menor média da força máxima relativa (N/mm) foi computada para o Material 1 (423 ± 61 N/mm), seguida pelo Material 2 (539 ± 101 N/mm) e por fim, pelo Material 3 (558 ± 54 N/mm).

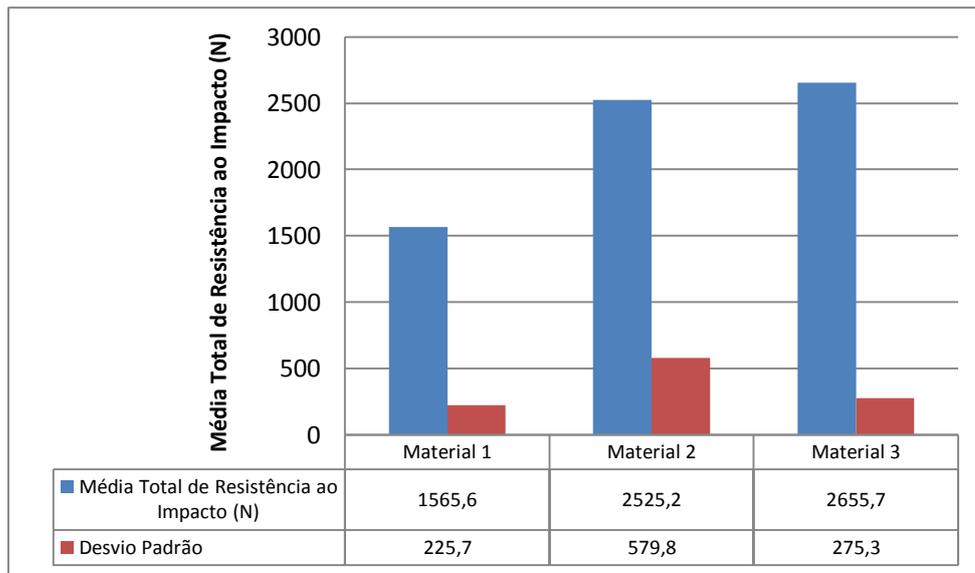


Figura 103 – Médias de resistência ao impacto para os três materiais analisados.

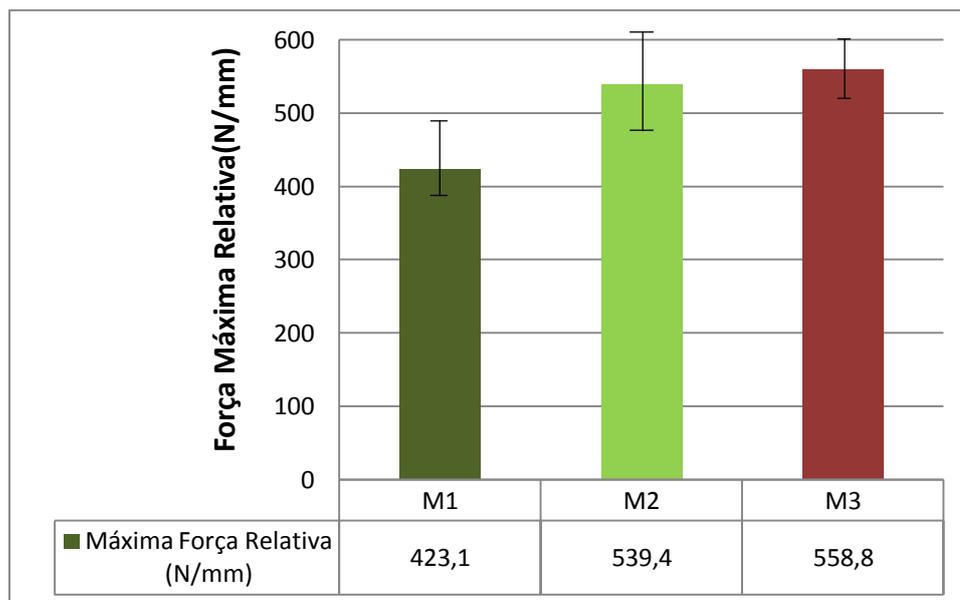


Figura 104 – Força máxima (N/mm) para cada material

De acordo com SILVA (2003), os dois mecanismos básicos de absorção de energia dos materiais são a criação de novas superfícies de fratura e a deformação do material.

No ensaio de impacto, o primeiro mecanismo a operar é a deformação do material e, sendo a energia incidente suficientemente alta, ocorre a iniciação e a

propagação da trinca, atuando como o segundo mecanismo de absorção de energia. No caso dos compósitos, os mecanismos de absorção de energia de maior contribuição para a sua tenacidade ocorrem durante a propagação da trinca e são a extração das fibras e o descolamento da interface (BLEDZKI & GASSAN, 1999). Estes mecanismos consomem energia pela criação de uma maior área superficial de fratura dentro do compósito e pelo trabalho de fricção na interface.

Os valores médios da energia de fratura para cada tipo de material são apresentados em duas parcelas distintas. Primeiramente temos a iniciação e depois a propagação da fratura (Figura 105). Para a etapa de iniciação, o Material 1 apresentou valor de 1256 ± 401 Nmm/mm, o Material 2 apresentou valor de 2256 ± 519 Nmm/mm e o Material 3 apresentou valor de 1750 ± 530 Nmm/mm. Para a etapa de propagação, o Material 1 apresentou valor de $1674,4 \pm 542$ Nmm/mm, o Material 2 apresentou valor de 3511 ± 544 Nmm/mm e o Material 3 apresentou valor de 2728 ± 238 Nmm/mm.

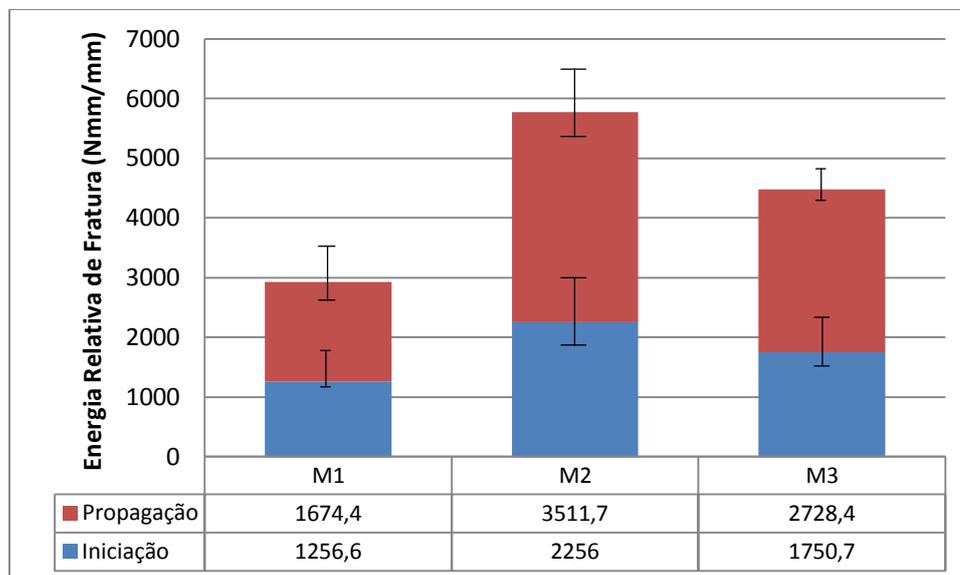


Figura 105 – Energia de fratura (Nmm/mm)

É possível observar na Figura 105, que a energia de iniciação do Material 2 é bem maior do que a energia de iniciação dos Materiais 1 e 3. Da mesma forma, a energia de propagação de fratura do Material 2 também é maior do que as energias de propagação para o Material 3. Portanto, o Material 2 apresentou uma

maior capacidade de absorção de energia de impacto para iniciar e propagar a fratura do que os outros dois materiais.

A Figura 106 discrimina separadamente a quantidade de energia gasta para iniciação e propagação da fratura, bem como o total de energia absorvida para cada material. A energia total necessária para a iniciação e a propagação de fratura do Material 2 foi de 5767 Nmm/mm, bem superior a do Material 1 (2930 Nmm/mm) e do Material 3 (4478 Nmm/mm).

Desta forma, de acordo com os dados apresentados o material que apresentou o melhor comportamento, ou seja, absorveu maior quantidade de energia e conseqüentemente apresentou uma maior resistência ao impacto foi o Material 2. Ele apresenta um comportamento semi-dúctil, com deformação plástica antes da fratura.

A Figura 107 comprova esta última afirmação, com dados sobre os deslocamentos obtidos para cada tipo de material. Na força máxima, o Material 2 apresentou maior deslocamento ($8,1 \pm 0,8$ mm), quando comparado com o Material 1 ($4,4 \pm 0,6$ mm) e com o Material 3 ($4,5 \pm 1,1$ mm).

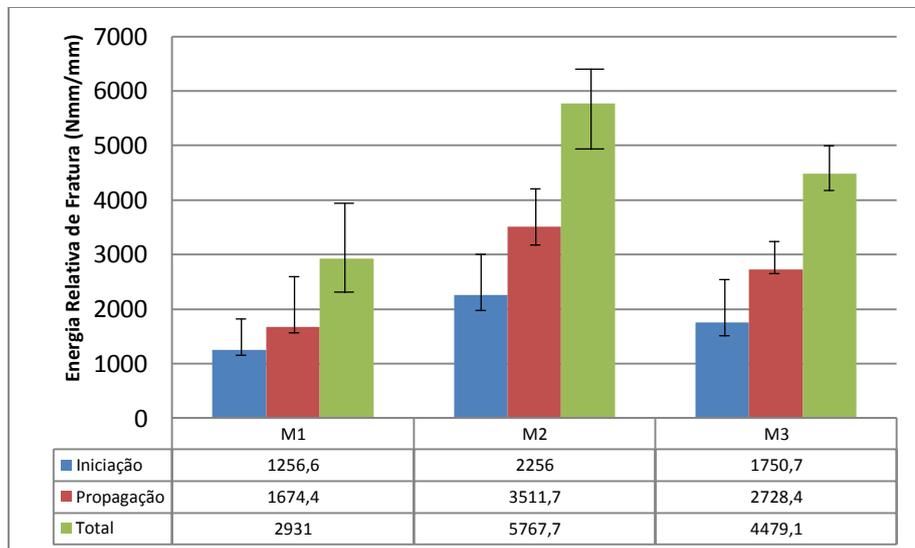


Figura 106 – Energia de fratura com valores de iniciação, propagação e total

Ainda, na Figura 107, é possível observar que o deslocamento do Material 3 foi bem menor em relação ao deslocamento do Material 2. Isso pode ser devido a

natureza da matriz epóxi que é mais rígida que a resina de mamona na proporção 2:1. O deslocamento final do Material 3 foi menor (17,2 mm) que o deslocamento do Material 1 (24,1 mm) e do Material 2 (26,1mm). Esse fato demonstra a natureza mais frágil do Material 3 em relação ao Material 2.

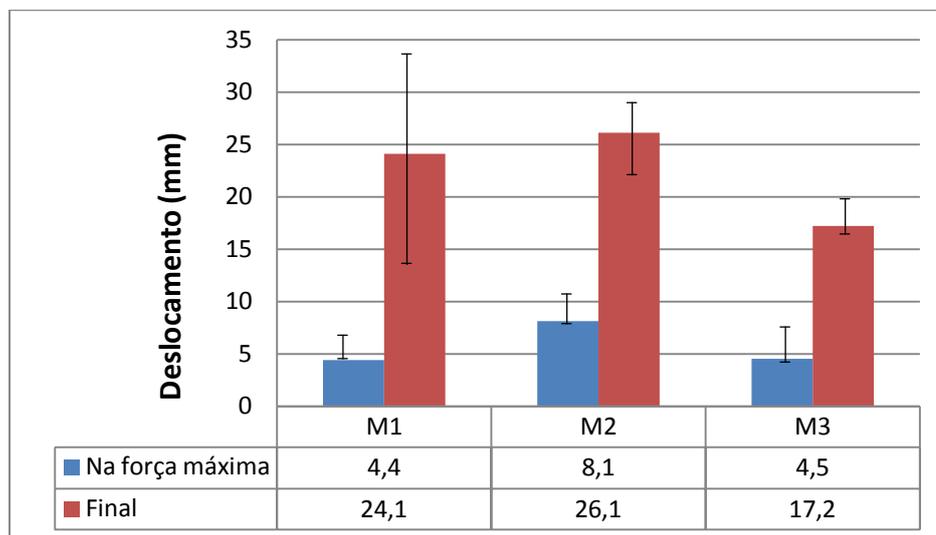


Figura 107 – Deslocamentos (mm) obtidos para cada tipo de material

4.2.5 Análise das superfícies de fratura de impacto através da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As micrografias a seguir ilustram alguns fatores importantes para a análise da fratura dos compósitos estudados.

A Figura 108 mostra as morfologias das superfícies de fratura de corpos de prova de impacto do Material 1. A Figura 108A mostra a superfície da amostra onde é possível observar a existência de micro-fraturas na matriz (setas pretas). A Figura 108B é um aumento da primeira imagem apresentada (destacada no retângulo) e ilustra ainda a existência de bolhas (indicadas por setas brancas) e vazios (indicados por setas pretas) na matriz. Nas duas micrografias não há sinais de extração de fibras da matriz.

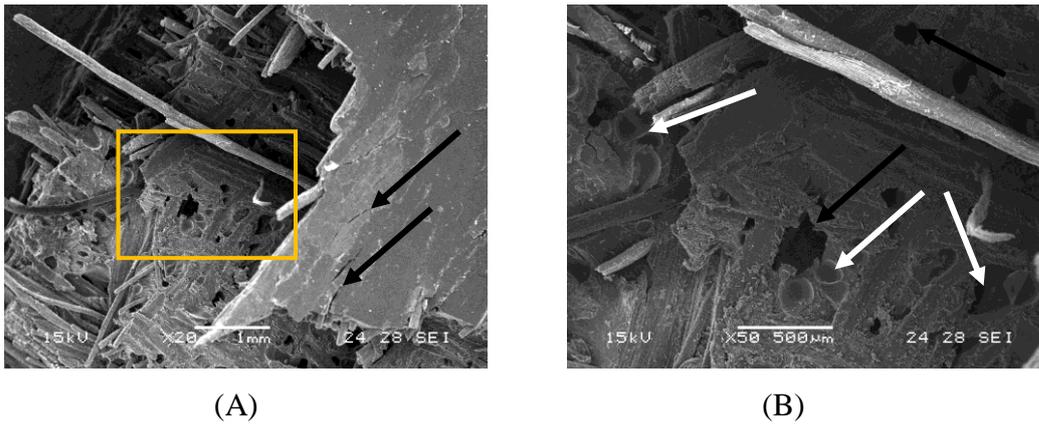


Figura 108 – (A) Superfície da amostra; (B) Bolhas na matriz do compósito – Material 1

A Figura 109 ilustra primeiramente a superfície da fratura e depois detalhes da interação fibra-matriz. É possível observar fibras fraturadas (indicadas por setas brancas), mas quase todas as fibras estão fraturadas no plano ou próximo ao plano de fratura da matriz. Ou seja, nas duas micrografias não foi detectado o fenômeno de extração da fibra da matriz, o que caracteriza uma boa adesão na interface fibra/matriz. Nessa figura é também possível observar bolhas (Figura 109A) e vazios (Figura 109B). As bolhas são normalmente provenientes do processo de mistura da matriz e que ficaram aprisionadas durante a cura da resina. Os vazios podem indicar regiões com falta de impregnação.

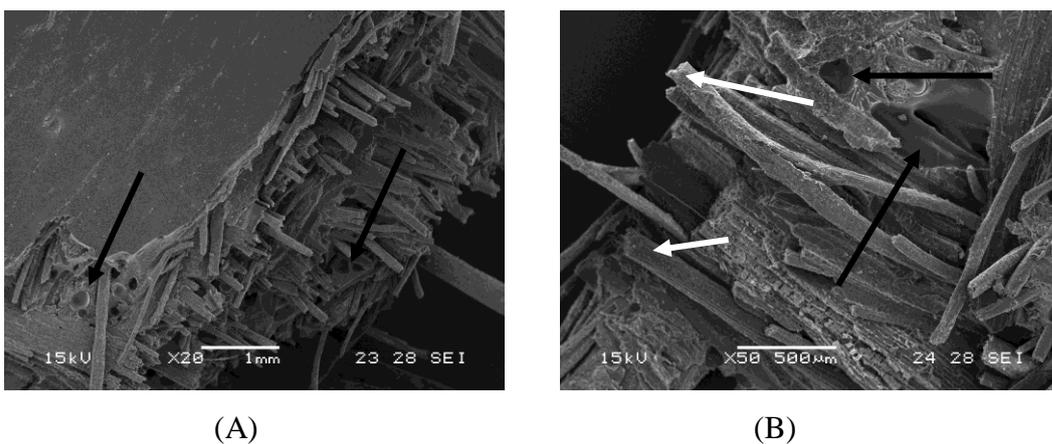


Figura 109 – (A) Bolhas na matriz; (B) Bolhas na matriz e fibra fraturadas – Material 1

A Figura 110 ilustra micrografias da superfície da fibra de ubuçu. A Figura 110A ilustra as protrusões na superfície de duas fibras de ubuçu (indicadas por setas pretas) e anteriormente identificadas na Figura 58. Já a Figura 110B mostra a superfície de uma fibra descolada da matriz onde é possível identificar a superfície da fibra fraturada (indicada por setas brancas). Nas duas imagens foi identificada a ocorrência do descascamento da fibra, separação do feixe de fibrilas que formam a fibra técnica, fato também observado por SILVA (2003) para o compósito de sisal e poliuretana de mamona.

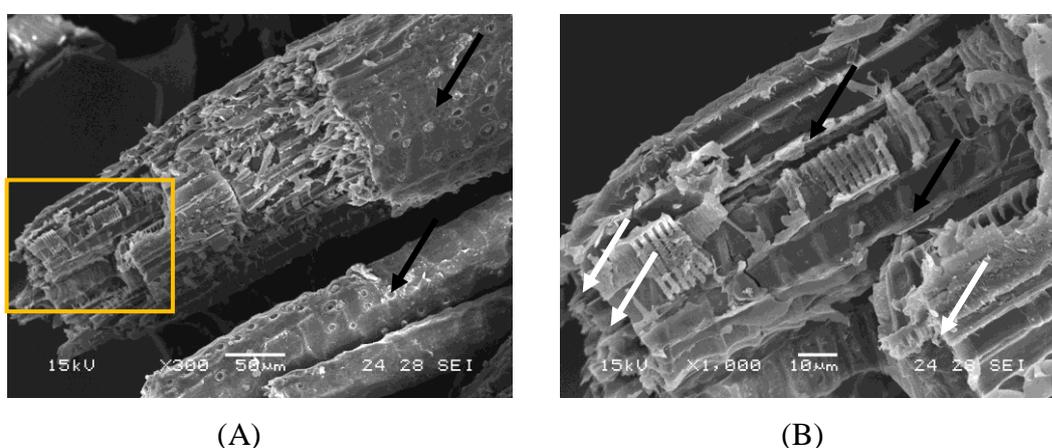


Figura 110 – (A) Protrusões na superfície da fibra; (B) Estrutura da fibra e superfície da fibra fraturada – Material 1

Na Figura 111 é possível observar uma fibra com boa aderência na interface e sem a ocorrência de extração (seta preta). Também é possível observar uma grande bolha na matriz (seta branca), fato também observado por SILVA (2003).

Em suma, é possível verificar dois principais mecanismos de falha para o Material 1 no ensaio de impacto: O primeiro é a existência de pequena deformação plástica (cisalhamento) da matriz e o segundo é o descascamento da fibra e em menor ocorrência, a sua extração da matriz.

A Figura 112 ilustra alguns fatores importantes para a análise da fratura do Material 2. É possível observar que a direção da fratura se deu principalmente através da matriz (seta preta), onde são observadas trincas.

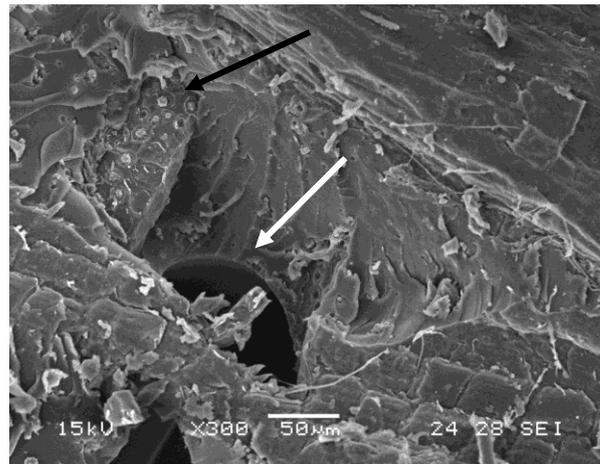


Figura 111 – Detalhe de ligação interfacial fibra/matriz e bolha – Material 1

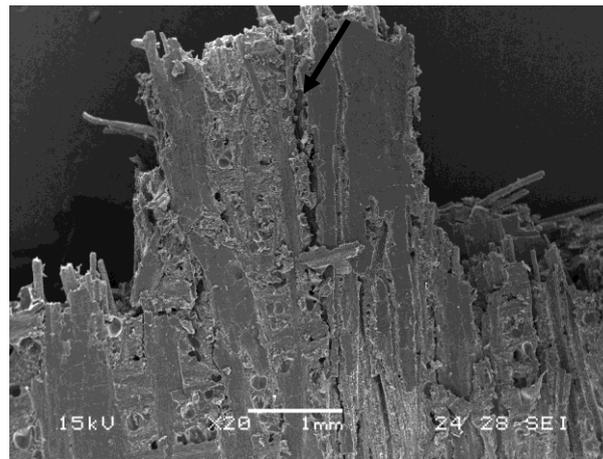


Figura 112 – Trinca se propagando na matriz do Material 2

As Figuras 113A e 113B são aumentos de 100 e 300 vezes para melhor visualizar as fraturas ocorridas no Material 2. Na Figura 113A é possível verificar micro trincas (setas pretas) e uma fibra rompida na superfície (setas brancas). Esses detalhes são melhor observados (ampliados) na Figura 113B, mostrando a superfície da matriz com microfissuras.

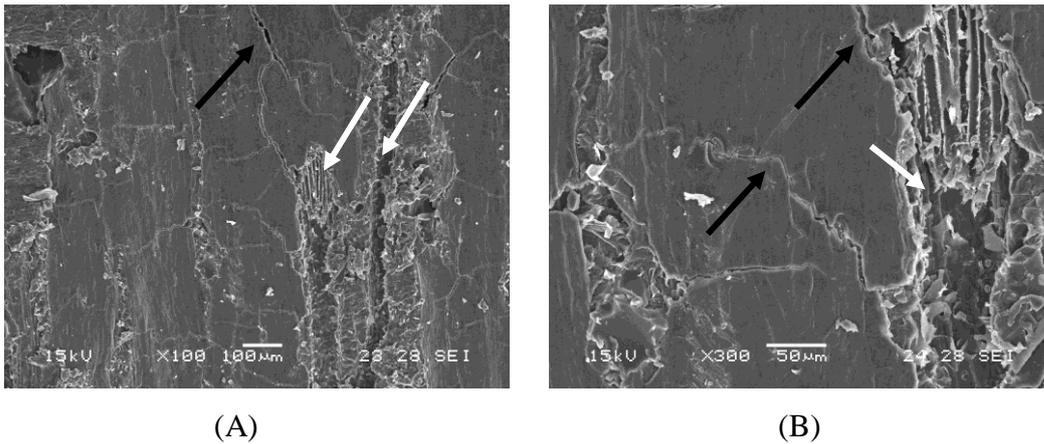


Figura 113 – (A) Fraturas no material da matriz; (B) Fibra rompida na superfície da matriz – Material 2

A Figura 114 mostra que a matriz do Material 2 possui alguma capacidade de deformação. Esse aspecto pode ser inferido dos cúspides observados na fratura da matriz, que são devidos a mecanismos de cisalhamento (D'ALMEIDA E MONTEIRO, 1998).

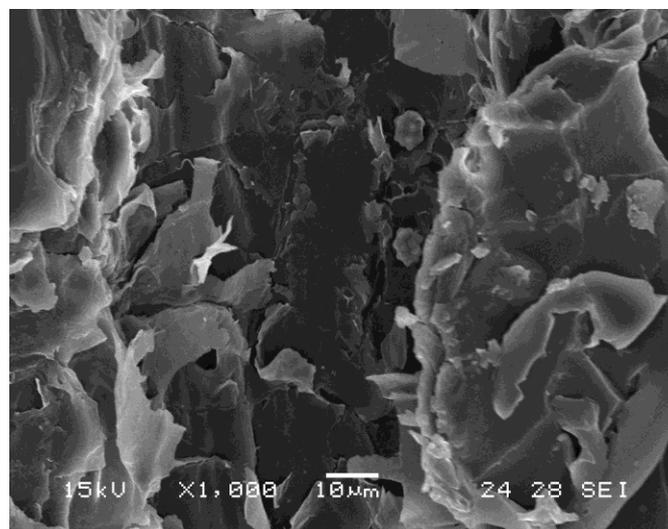


Figura 114 - Padrão de fraturas de matriz de natureza dúctil – Material

2

Nas Figuras 115A e 115B é possível verificar, pela morfologia das fibras, que parece haver ruptura das fibras no plano de falha da matriz, indicando que as fibras estão bem aderidas à matriz.

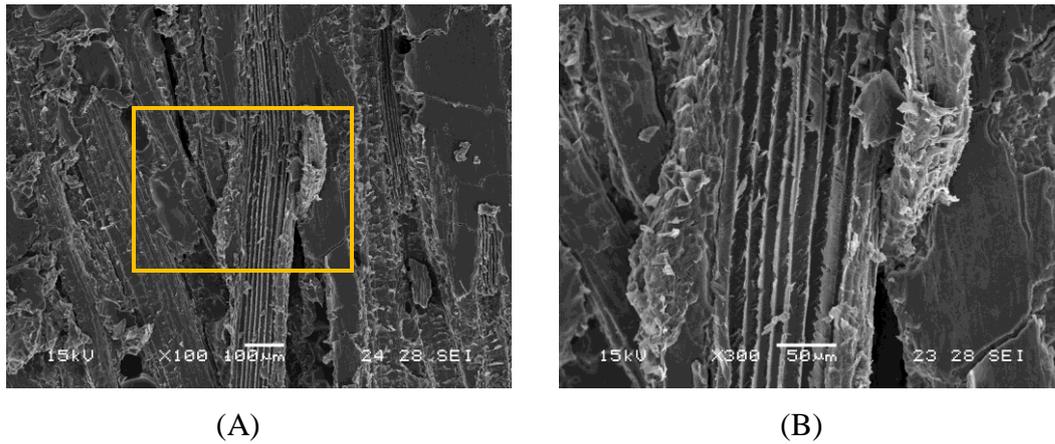


Figura 115 – (A) e (B) Fratura da fibra no plano da matriz.

As Figuras 116A e 116B mostram a presença de bolhas na matriz do Material 2 (setas).

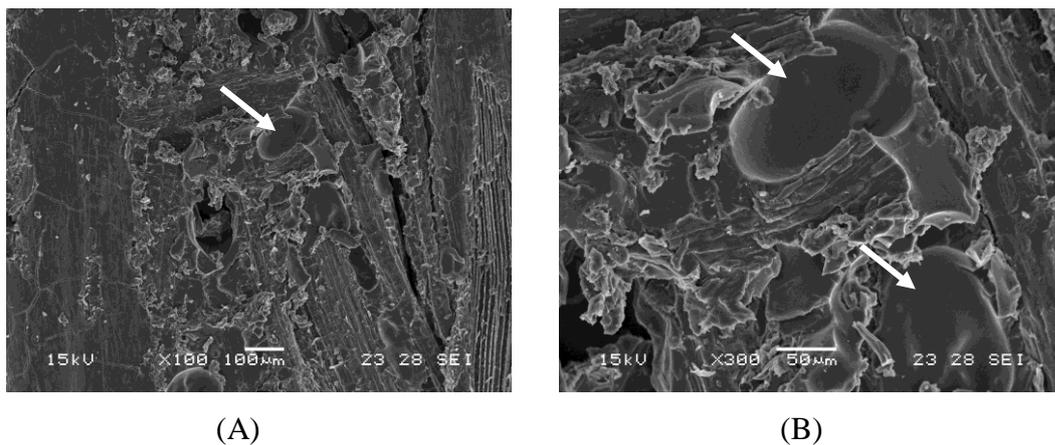


Figura 116 – (A) Evidências de bolhas; (B) Detalhe de bolhas detectadas na matriz – Material 2

Em suma, o principal mecanismo de falha para o Material 2 foi deformação da matriz seguida por fratura da mesma, e uma aparente boa interface fibra-matriz.

As micrografias a seguir ilustram o modo de falha do Material 3. As Figuras 117A e 117B ilustram que houve descolamento maciço das fibras, seguindo-se a fratura e subsequente “pull-out” ou arrancamento das fibras na superfície de fratura (setas). Este fato também foi observado por RAZERA (2006), para os

compósitos de resina fenólica reforçados com fibras de bananeira e resina fenólica reforçada com fibras longas de coco.

O mecanismo de “pull-out” dissipa energia devido ao atrito mecânico durante o arrancamento da fibra, aumentando a resistência ao impacto. Além disso, há dissipação de energia durante o processo de descolamento (“debonding”) das fibras tendendo a cessar a propagação da trinca (RAZERA, 2006). Os aspectos observados, entretanto, indicam uma interface fibra-matriz fraca.

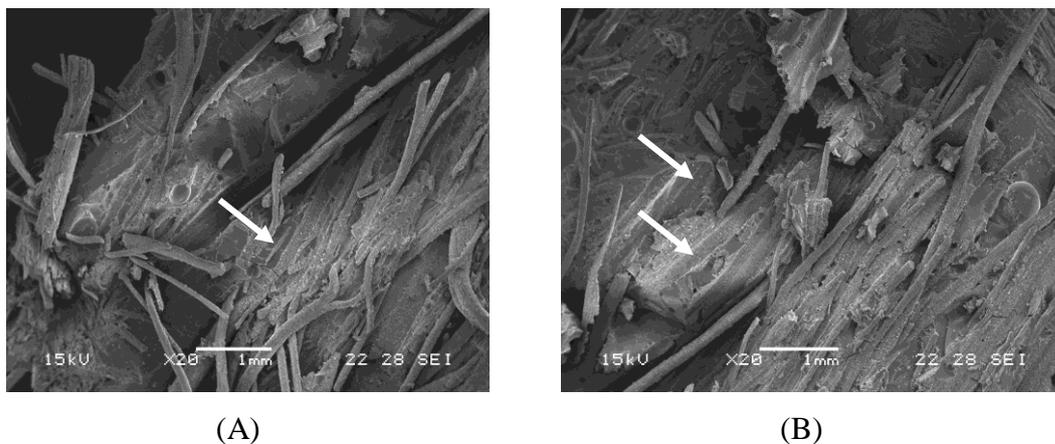


Figura 117 – (A) Descolamento maciço de fibras da matriz; (B) Detalhe mostrando a extração de fibras (pull-out) da matriz – Material 3

As Figuras 118A e 118B mostram em maior detalhe o descolamento das fibras (a superfície da fibra descolada da matriz é claramente vista e está indicada por setas brancas). Outro fator observado é um vazio deixado por uma fibra que foi extraída da matriz (Figura 118B, indicado por uma seta branca) sendo observado ainda que houve, na matriz um tipo de fratura do tipo frágil (seta preta).

A Figura 119A ilustra a presença de grandes bolhas na matriz (setas) e a Figura 119B ilustra novamente a fratura na matriz, de natureza eminentemente frágil (setas pretas), bem como uma fibra descolada da matriz (seta branca), onde é possível observar a superfície da fibra (protrusões) intacta.

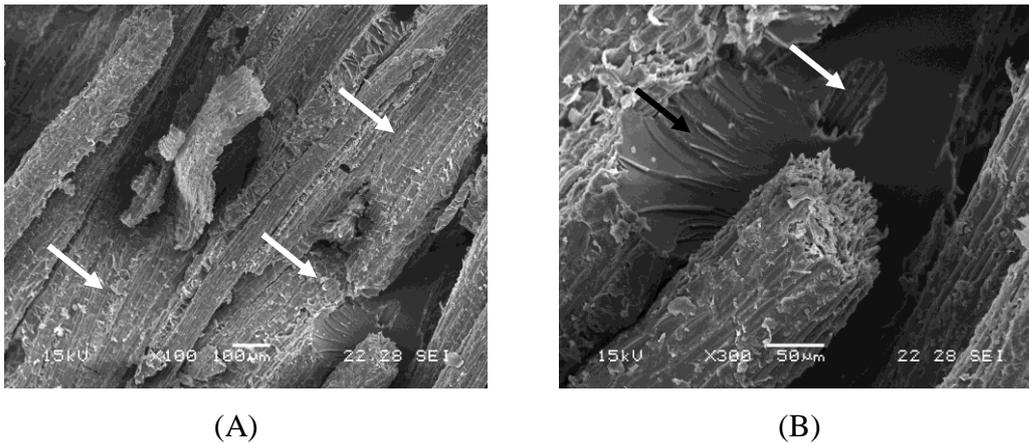


Figura 118 – (A) Superfície na matriz da fibra arrancada; (B) Buraco deixado por uma fibra arrancada e fratura frágil a semi-dúctil – Material 3

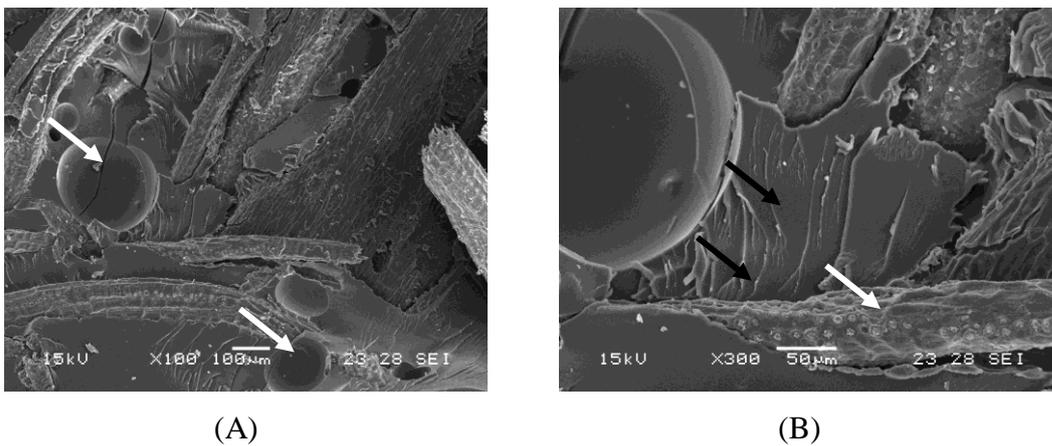


Figura 119 – (A) Existência de bolhas na matriz; (B) Fraturas frágil e semi-dúctil e fibra descolada – Material 3

A Figura 120 é um bom resumo dos mecanismos de falha ocorridos no Material 3. É possível observar tanto a fratura plana do tipo frágil na matriz (seta pretas), quanto se pode observar também, uma fibra extraída da matriz (seta branca) e finalmente as bolhas decorrente do processo de fabricação existentes na matriz (setas vermelhas).

Em resumo, os mecanismos de falha no Material 3 foram o descolamento de fibras (pull-out), fratura e extração das fibras da matriz.

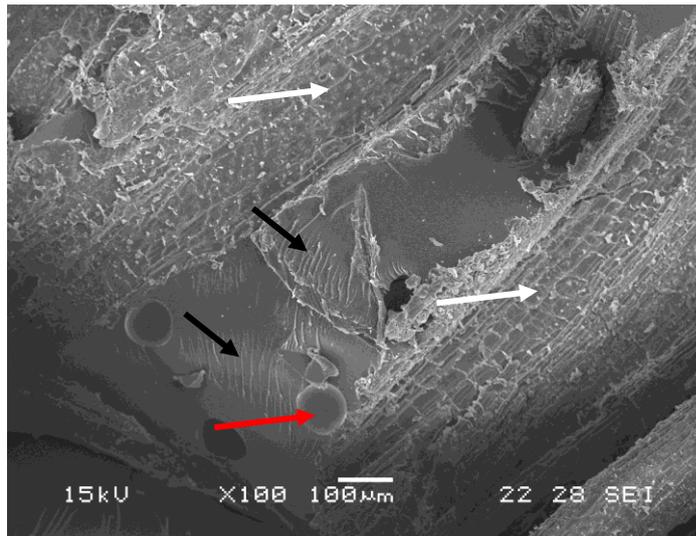


Figura 120 – Mecanismos de falha no Material 3

Observou-se que no Material 3 ocorreu em maior quantidade o fenômeno de “pull-out” ou extração de fibras, ou seja, ocorreu dissipação de energia por atrito mecânico, e simultaneamente ocorreu a falha de interface (“debonding”). Assim, é possível concluir que os materiais 1 e 2 apresentaram interface melhor que a do material 3.

Uma falha, observada nos três tipos de compósitos analisados, foi a presença de vazios e bolhas, provenientes do processo de fabricação. Os vazios e bolhas afetam as propriedades do material já que os mesmos atuam como concentradores de tensão e reduzem a absorção de energia de impacto (SANTOS 2007).

SILVA (2003) atribui a alta absorção de energia de compósitos com tecido ao atrito entre as fibras que formam os fios do tecido, resultante da ação de cisalhamento. A alta tenacidade à fratura e resistência ao impacto constituem as principais vantagens de compósitos com fibras naturais. Porém, a resistência mecânica do compósito é muito dependente da resistência interfacial e, como visto, uma alta resistência interfacial pode diminuir a capacidade de absorção de energia do compósito. Resumindo, uma maior resistência ao impacto nem sempre está associada com alta resistência mecânica da interface. O balanço entre estas propriedades dependerá da aplicação pretendida. O Material 3, por exemplo, apresentou um média de resistência ao impacto de $2655,7 \pm 275\text{N}$, porém, como foi mostrado na Figura 118, houve um grande descolamento de fibras,

demonstrando uma interface fraca. Esse fato não aconteceu com o Material 2, que apresentou uma resistência ao impacto de $2525 \pm 579\text{N}$ sem descolamento maciço de fibras. Pode-se concluir previamente que, apesar dos materiais 1 e 3 terem resistência ao impacto semelhantes, suas propriedades mecânicas e modos de falha são distintos.

4.2.6 Ensaio de abrasão

Os corpos de prova foram usinados de acordo com as especificações descritas anteriormente, no item 3.2.2.5. Cada amostra apresentou um diâmetro aproximado de 16 mm e um comprimento de pelo menos, 15 mm. Como a primeira etapa do ensaio de abrasão consistiu na pesagem dos cada corpo de prova, a Figura 121 ilustra os valores computados para as médias das massas dos corpos de prova para cada grupo de compósito. O Material 1 apresentou uma média de pesos de $2,9673 \pm 0,10\text{g}$, o Material 2 uma média de pesos de $3,2768 \pm 0,01\text{g}$ e finalmente o Material 3, uma média de pesos de $3,2456 \pm 0,02\text{g}$. É possível observar que o Material 2 apresentou uma massa maior para seus corpos de prova, seguido pelo Material 3 e por fim, o Material 1.

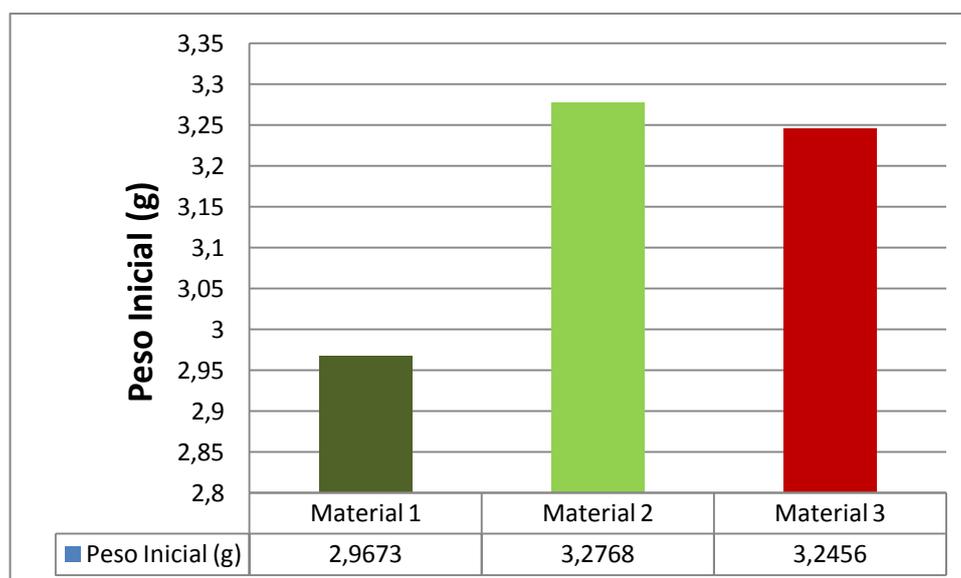


Figura 121 – Média dos pesos das amostras antes do ensaio de abrasão

A Figura 122 ilustra os valores computados para as médias das massas dos corpos de prova divididos por grupos de materiais após o ensaio de abrasão. O Material 1 apresentou massa final de $2,2396 \pm 0,08\text{g}$, o Material 2 apresentou $2,4412 \pm 0,05\text{g}$ e o Material 3 massa final de $2,5917 \pm 0,07\text{g}$. Esses valores foram transformados em porcentagem na Figura 123, a fim de se analisar o desgaste abrasivo sofrido por cada material.

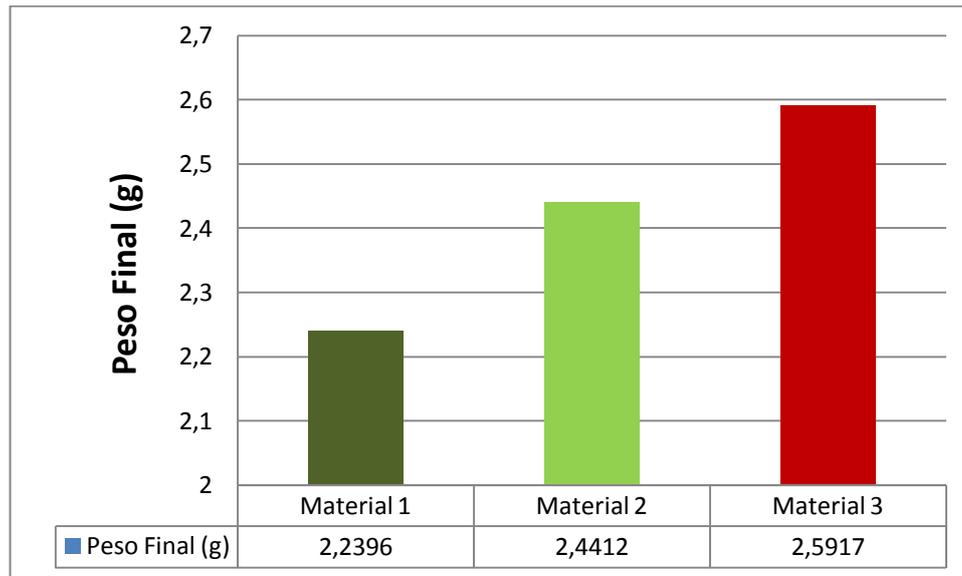


Figura 122 – Média dos pesos das amostras após o ensaio de abrasão

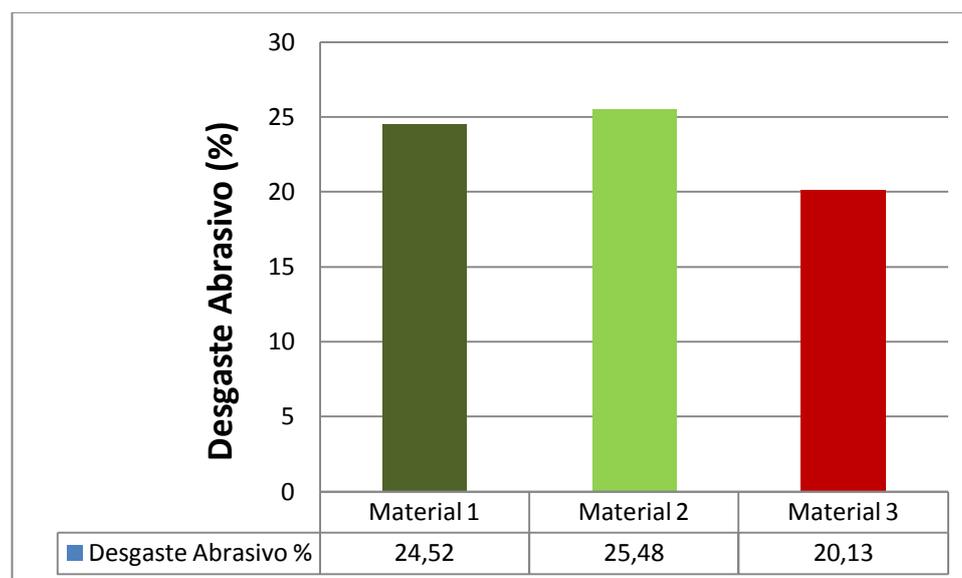


Figura 123 – Desgaste abrasivo (%) dos materiais analisados

De acordo com a Figura 123, o Material 1 apresentou um desgaste abrasivo ($24,52 \pm 0,08\%$) que ao nível de 0,05 (t-Test Microcal Origin) diferiu estatisticamente do Material 2 ($25,49 \pm 0,05\%$). O que se pode concluir em relação ao desgaste abrasivo destes dois materiais é que ambos apresentaram uma massa final de mais de 60% de massa inicial após o percurso de 40m, o que tecnicamente os torna viáveis para serem utilizados como materiais para pisos.

Em relação a esta última afirmação, OLIVEIRA (2005) coloca que no ensaio de abrasão, para que um material seja considerado de resistência aceitável comercialmente para fabricação de pisos, é necessário que o mesmo atinja, no abrasímetro, o percurso de 40m, com uma massa final maior que 60% de sua massa inicial.

Dos materiais analisados, o Material 3 apresentou o menor desgaste abrasivo ($20,13 \pm 0,07\%$). Este resultado está diretamente relacionado com o fato de a resina epóxi ser mais rígida que a resina de mamona nas duas proporções analisadas.

Como os materiais compósitos aqui analisados são considerados alternativos, buscou-se na literatura, resultados de ensaios de abrasão realizados com materiais dessa categoria. Nesse contexto, OLIVEIRA (2005) pesquisou o uso do bambu laminado colado na fabricação de pisos e encontrou um desgaste abrasivo para esta gramínea de 20,34%, comparável com os resultados aqui encontrados. Em relação a madeiras ditas alternativas, BARCELLAR & D'ALMEIDA (2010) realizaram um ensaio de abrasão para a madeira de pupunha e determinaram um desgaste abrasivo de 9,8%, já para o coqueiro o desgaste abrasivo foi de 19,8%.

OLIVEIRA (2005) também reportou valores de desgaste abrasivo para o ipê (12,63%), sucupira (15,68%) e jatobá (23,67%). Comparando os valores de desgaste abrasivo para as madeiras de lei com os encontrados nesta pesquisa, é possível concluir que os compósitos ora analisados, apresentam viabilidade técnica de utilização na fabricação de pisos, já que o desgaste abrasivo apresentado foi menor que 26% para todas as amostras. É importante frisar que a realização de uma comparação entre os compósitos e estas madeiras se deu pelo fato de as madeiras serem consideradas compósitos naturais.

Em função das propriedades das matérias primas até então apresentadas e discutidas, das disponibilidades regionais e da problemática ecológica em relação a algumas madeiras, o uso desse compósito alternativo, pode ser uma fonte de renda para a população que o produzir, especificamente, a população ribeirinha do Estado do Amapá. Dessa forma, os resultados do ensaio de abrasão vêm fortalecer essa idéia, fornecendo dados técnicos sobre o uso desse compósito na fabricação de pisos do tipo taco.

4.2.6.1 Microscopia Eletrônica de Varredura – Análise das superfícies de abrasão

Após a realização do ensaio de abrasão, as amostras testadas foram acondicionadas e levadas ao laboratório de microscopia eletrônica a fim de se analisar as superfícies que sofreram abrasão. Desta forma, coletou-se uma amostra de cada grupo de material analisado e capturaram-se imagens em quatro aumentos, ou seja, 50; 100; 150 e 200 vezes.

A Figura 124 apresenta o bloco de micrografias obtidas para o Material 1. Na Figura 124A é possível observar que a superfície do Material 1 apresenta riscos causados pelos grânulos da lixa abrasiva (seta branca). De forma geral, não é perceptível a existência de fibras expostas na superfície. Na Figura 124B é possível observar em maior detalhe que a superfície apresenta uma maior quantidade de riscos (setas brancas) causados pelos grânulos da lixa, bem como a existência de fibras expostas (setas pretas). As Figuras 124C e 124D apresentam mais detalhadamente a superfície (setas brancas), sem maiores quantidades de fibras expostas.

A Figura 125 apresenta o bloco de micrografias obtidas para o Material 2. Nas Figuras 125A e 125B é possível observar que a superfície do Material 2 é bastante irregular e apresenta um número grande de fibras expostas (setas brancas). Nas Figuras 125C e 125D já possível observar em maior detalhe as fibras expostas (setas brancas) na superfície. Comparando-se este bloco de micrografias com as do Material 1, é possível concluir que maiores quantidades de fibras foram expostas no superfície do Material 2, o que o faz menos resistente a abrasão. De fato, esse compósito foi o que mostrou o maior desgaste abrasivo.

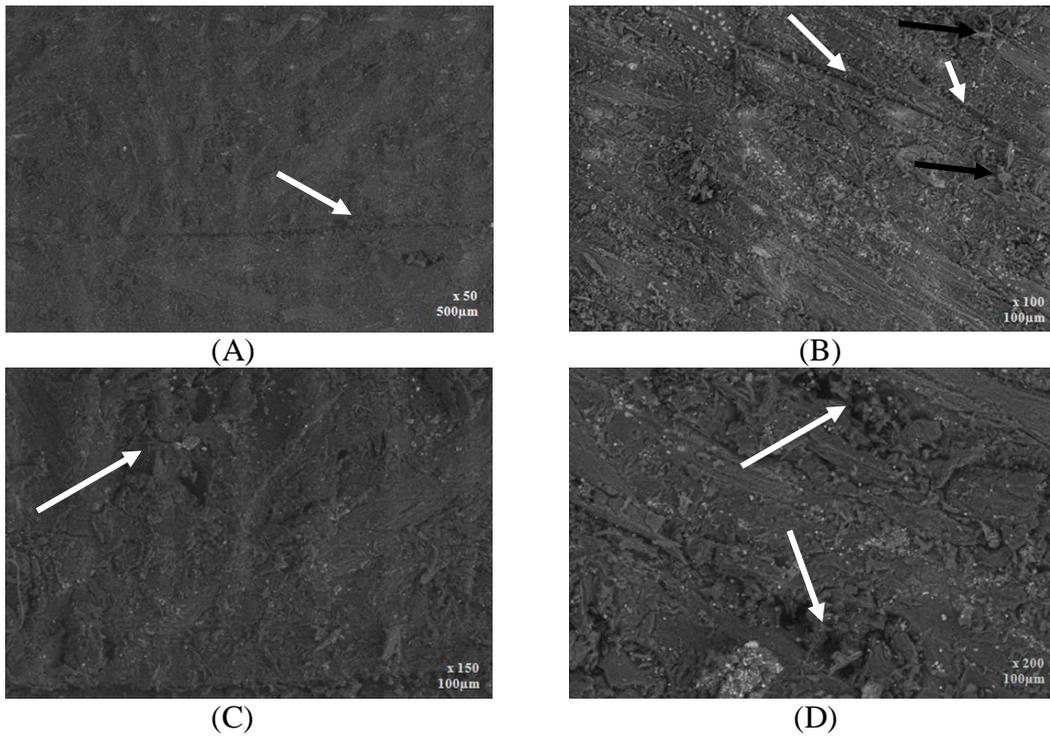


Figura 124 – Micrografias da superfície que sofreu abrasão para o Material 1

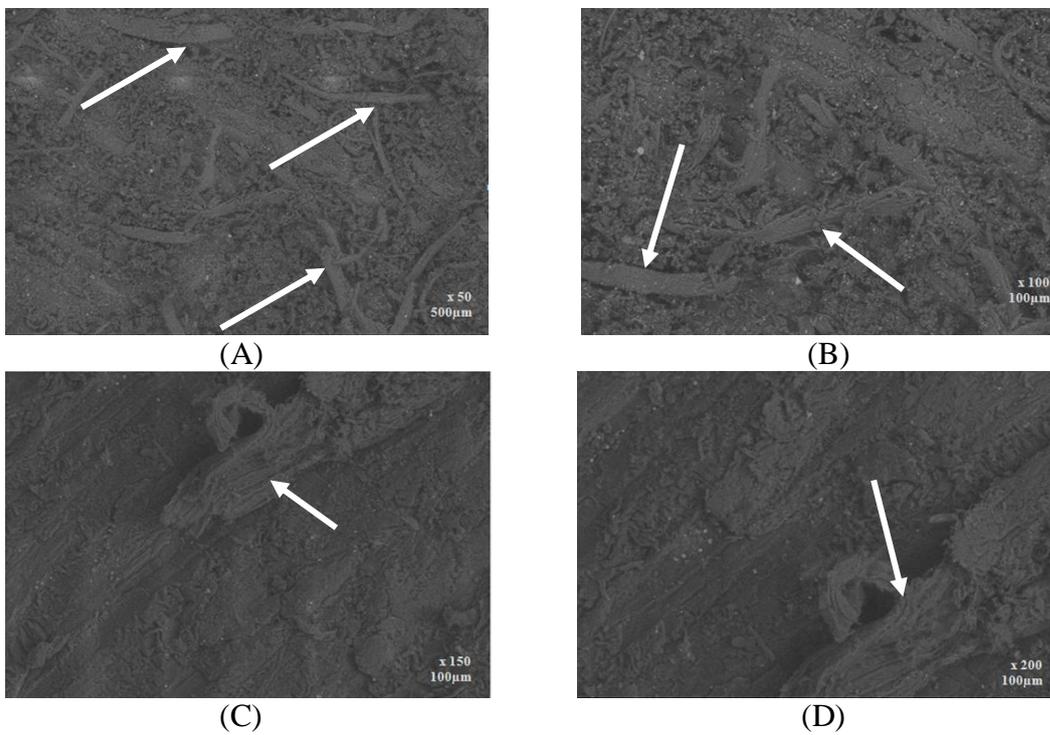


Figura 125 – Micrografias da superfície que sofreu abrasão para o Material 2

A Figura 126 apresenta o bloco de micrografias obtidas para o Material 3. De forma geral, a superfície se apresenta mais regular em termos de danos do que a do Material 2. Nas Figuras 126^a e 126B é possível observar que a superfície do Material 3 é bastante regular, porém apresenta algumas fibras expostas (setas brancas), o que não aconteceu com a superfície do Material 1. Nas Figuras 126C e 126D já é possível observar em maior detalhe as fibras expostas (setas brancas), bem como a presença de alguns sulcos causados pelos grânulos da lixa abrasiva (setas pretas). Comparando-se este bloco de micrografias com o Material 2, é possível concluir que menores quantidades de fibras foram expostas na superfície do Material 3, bem como a superfície se apresentou mais regular ou menos danificada que as outras, devendo-se este fato, a natureza rígida da matriz epóxi. De maneira geral, os três materiais compósitos aqui analisados não apresentaram trincas em sua superfície, o que demonstra a eficácia de reforço das fibras de ubuçu nas matrizes poliméricas.

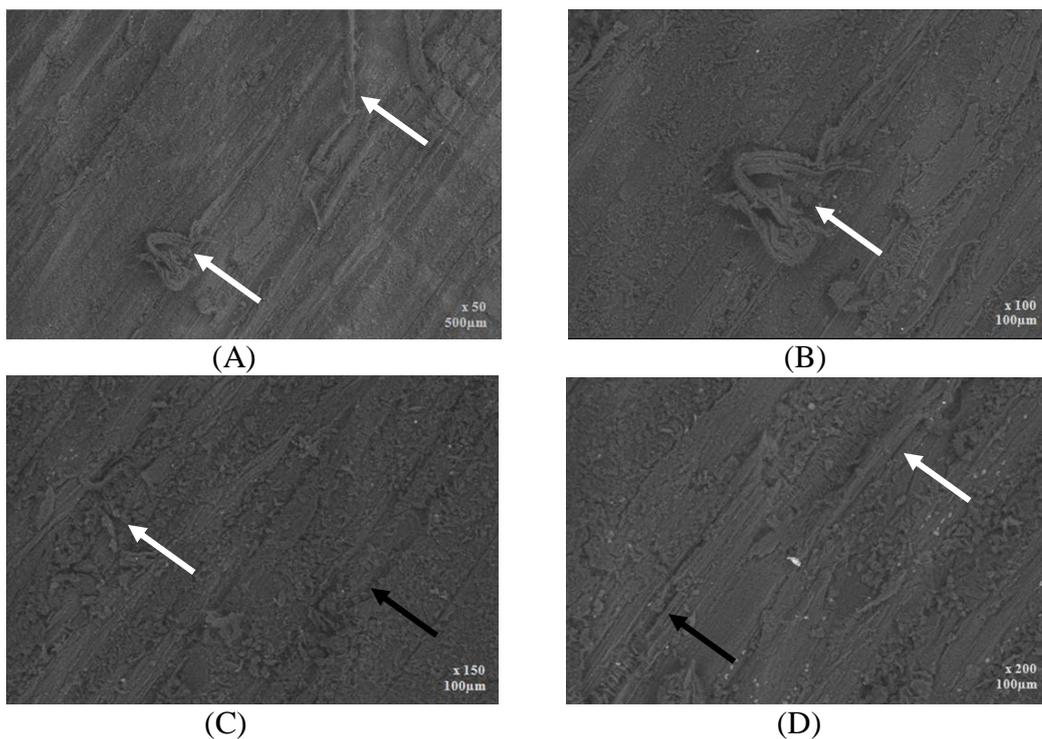


Figura 126 – Micrografias da superfície que sofreu abrasão para o Material 3

Amostras de pupunha e coqueiro foram também testadas em abrasão e suas superfícies analisadas em MEV para serem comparadas com as dos materiais compósitos aqui estudados, pois apresentam desgaste abrasivo pequeno (BACELLAR, 2010). A Figura 127 apresenta o bloco de micrografias obtidas para a madeira de pupunha. Nas Figuras 127A e 127B é possível observar que a superfície da pupunha apresenta como principal característica a presença de trincas (setas pretas). Nas Figuras 127C e 127D já é possível observar em maior detalhe que também existem as fibras expostas (setas brancas). A presença de grandes sulcos causados pelos grânulos da lixa abrasiva (setas pretas) e trincas também são evidentes nessas micrografias.

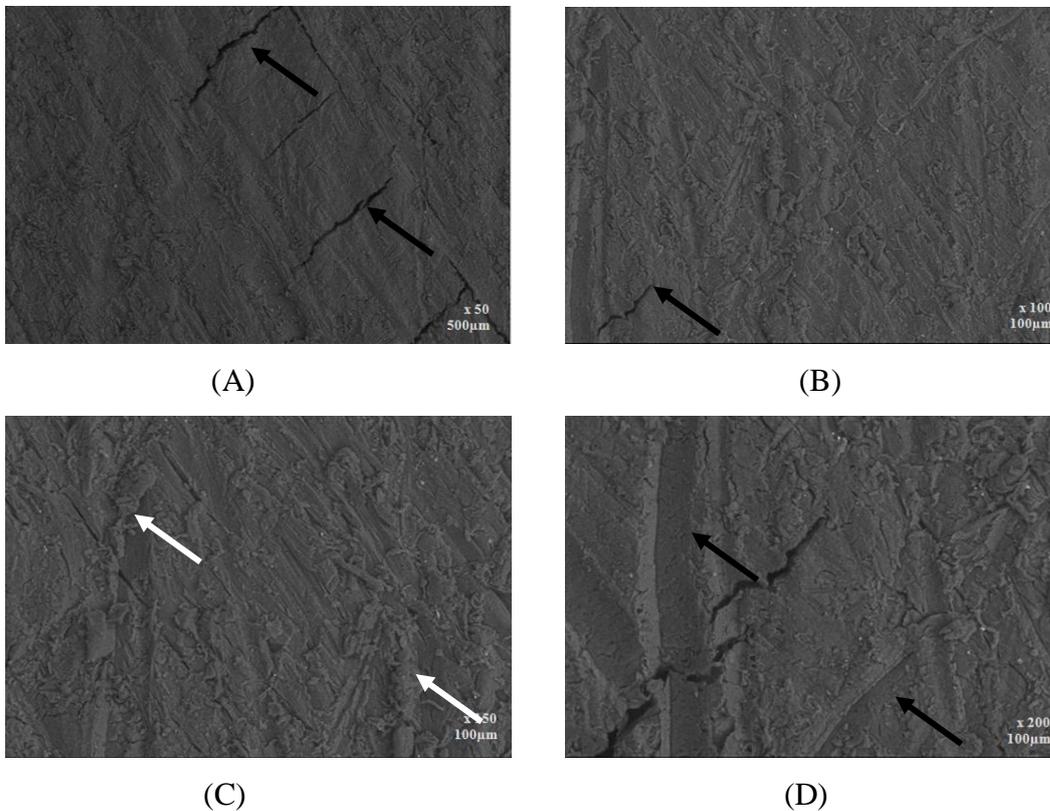


Figura 127 – Micrografias da superfície que sofreu abrasão para a madeira de pupunha

Comparando-se as micrografias da pupunha com as micrografias dos compósitos analisados, é possível verificar que esta madeira apresentou três tipos de falhas na superfície: fibras expostas, presença de sulcos (mais severos que os existentes nos compósitos) e, principalmente a presença de trincas, faz com que

haja infiltração de umidade no material. As trincas não foram detectadas nos compósitos, o que pode indicar que tais materiais podem ser utilizados na fabricação de pisos e revestimentos sem a problemática da existência de trincas.

A Figura 128 apresenta o bloco de micrografias obtidas para a madeira de coqueiro. A principal característica observada nas Figuras 128A e 128B é a presença de trincas na superfície do coqueiro, bem parecidas com as da pupunha (setas brancas). Nas Figuras 128C e 128D já é possível observar em maior detalhe a superfície irregular, a presença de sulcos causados pelos grânulos da lixa abrasiva (setas brancas). A existência de trincas pode vir do fato de que as madeiras de coqueiro e pupunha são compactas, o que as torna mais propícias ao surgimento dessas trincas. Em relação a este fato, JANKOWSKY (2002), cita que as rachaduras ou trincas aparecem como consequência da diferença de retração nas direções radial e tangencial da madeira e de diferenças de umidade entre regiões contíguas de uma peça, durante o processo de secagem. Essas diferenças levam ao aparecimento de tensões que, tomando-se superiores à resistência dos tecidos lenhosos, provocam a ruptura da madeira.

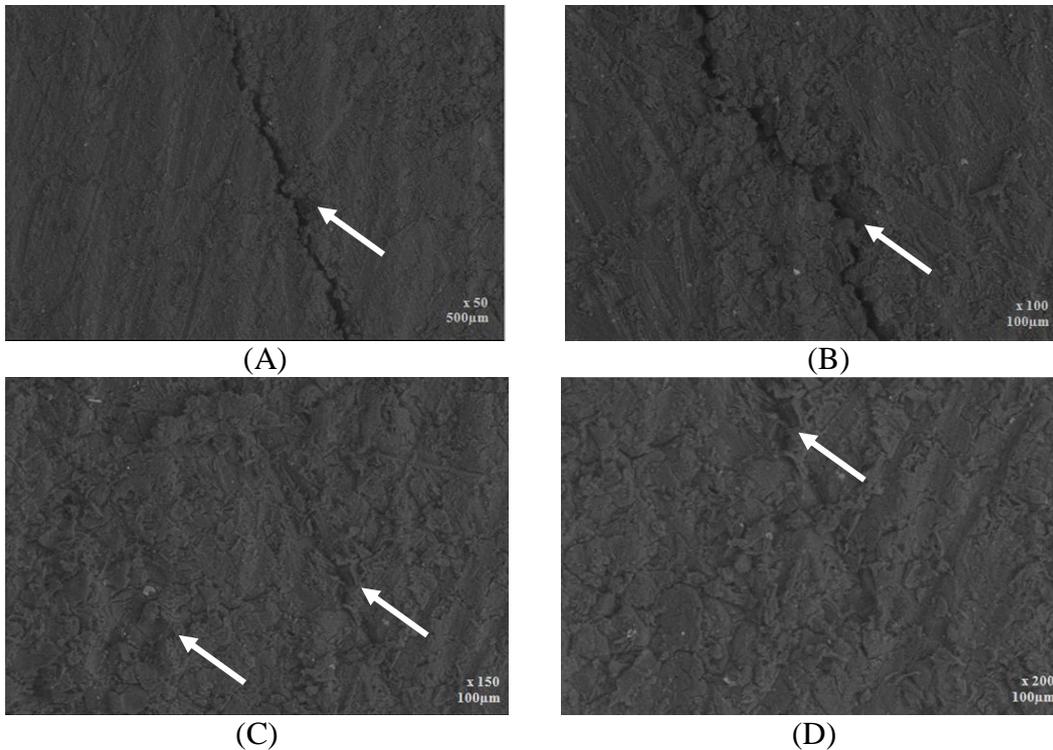


Figura 128 – Micrografias da superfície que sofreu abrasão para a madeira de coqueiro

Comparando-se as madeiras de coqueiro e pupunha com os compósitos fabricados nesta pesquisa, é possível concluir que as trincas encontradas nas ditas “madeiras alternativas” são prejudiciais ao seu uso em pisos. Mesmo os três compósitos analisados apresentando um desgaste abrasivo maior que as madeiras de pupunha e coqueiro, eles não apresentaram trincas na superfície, o que os torna eficientes para a fabricação de pisos e revestimentos.

4.2.7 Análise Dinâmico Mecânica – DMA

O objetivo do presente ensaio foi realizar um estudo exploratório e preliminar sobre a variação dos parâmetros dinâmico-mecânicos dos compósitos, sendo analisados em função de T.

TRINDADE et al., (2005) citam que estudos das propriedades dinâmico-mecânicas de compósitos reforçados com fibras vegetais são de grande importância, considerando que estes materiais podem ser submetidos a tensões dinâmicas durante sua aplicação. A técnica de DMTA é amplamente usada na caracterização de polímeros para fornecer três parâmetros em função da temperatura, que são o módulo de armazenamento (E'), módulo de perda (E'') e $\tan \delta$.

MURAYAMA (1982) cita que na região em que o módulo de armazenamento (E') apresenta um ponto de inflexão, a curva de amortecimento ($\tan \delta$) passa por um máximo, o que caracteriza a região de transição vítrea. Nesta região, o amortecimento ($\tan \delta$) se torna alto, devido ao início dos movimentos coordenados de segmentos das cadeias moleculares. Em polímeros, normalmente alguns segmentos têm maior liberdade para se movimentar, enquanto outros não. Um segmento com maior grau de imobilização (rígido) pode armazenar mais energia para uma dada deformação que um segmento mais livre para se movimentar. Desta forma, cada vez que um segmento mais rígido torna-se mais livre, o excesso de energia é dissipado como calor.

O módulo de perda (E'') apresenta máximo em temperaturas um pouco menores do que o pico máximo da curva de amortecimento ($\tan \delta$). O máximo de dissipação de calor por unidade de deformação ocorre na temperatura em que E'' é máximo. Esta temperatura, a 1 Hz de frequência, está próxima ao valor de

temperatura de transição vítrea determinada por outros métodos. Desta maneira, também, pode-se utilizar o módulo de perda para se estimar a transição vítrea. A T_g , entretanto, pode ser definida como a temperatura em que ocorre o máximo de $\tan \delta$, o máximo de E'' ou no ponto médio da curva E' versus temperatura (MURAYAMA, 1982).

PAIVA (2006) cita que as propriedades dinâmico-mecânicas dos compósitos são determinadas pelas propriedades de seus componentes, morfologia do sistema e a natureza da interface.

TRINDADE (2005) expõe que nas análises de resultados de compósitos reforçados com fibra lignocelulósica, deve-se considerar que há diferença entre os coeficientes de expansão térmica das fibras e das matrizes, o que pode influir nos resultados.

Na Tabela 14 estão listados os valores da temperatura de transição vítrea (T_g), da altura do pico de $\tan \delta$ e o valor máximo do módulo de armazenamento (E'), à temperatura ambiente, para os compósitos analisados.

Tabela 14 – Temperatura de transição vítrea (T_g), pico de $\tan \delta$ e módulo de armazenamento para os três materiais compósitos analisados

Material Compósito	T_g (°C) (máximo de $\tan \delta$)	Pico de $\tan \delta$	E' (Pa) (25°C)
Material 1	87	0,23	$5,33 \times 10^8$
Material 2	25	0,21	$2,91 \times 10^8$
Material 3	60	0,33	$6,63 \times 10^8$

De acordo com a Tabela 14, o valor de T_g (medido no ponto máximo de $\tan \delta$) foi de 87°C para o Material 1. Esse resultado é ligeiramente superior ao encontrado por SILVA (2003) para o compósito de fibra de sisal não tratada com matriz de poliuretana de mamona (83,1°C) e ao do compósito de fibra de coco e resina de mamona (82,1°C). Para o Material 2, encontrou-se a mais baixa T_g (25°C), devendo-se esse valor a natureza flexível da matriz de resina de mamona na proporção de 2:1 de seus componentes. Para o Material 3, encontrou-se uma T_g de 60°C, resultado inferior ao encontrado para o Material 1, porém superior ao

encontrado para o Material 2. É preciso frisar que de acordo com a literatura existente, os valores de E' encontrados nesta pesquisa foram menores. Por exemplo, SILVA (2003) encontrou para o compósito de fibra de sisal e resina de mamona, um módulo de armazenamento da ordem de $2,2 \times 10^9$ Pa.

SILVA (2003) ainda fez um estudo da T_g somente para o poliuretano de resina de mamona, encontrando um valor de 84°C . Tomando-se por base esse valor, é possível verificar que o Material 1 apresentou uma T_g semelhante (87°C). É de senso comum esperar que com uma maior interação entre a fibra e a matriz haja restrição ao movimento dos segmentos das cadeias macromoleculares localizadas próximo a superfície da fibra (SILVA, 2003). Esta restrição causa aumento da temperatura de transição vítrea e decréscimo do amortecimento, devido ao aumento da rigidez do material. A restrição ao movimento molecular da matriz pode também ocorrer devido à diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos componentes, (DUTRA et al., 2000). Este efeito é mais notado na região de transição vítrea (T_g) e ocorre devido à tensão a que a matriz é submetida quando da expansão térmica dos constituintes (SILVA, 2003).

Já os valores das alturas dos picos de tan delta (Tabela 14) encontrados para o Material 1 (0,24), para o Material 2 (0,22) e para o Material 3 (0,33) são comparáveis aos encontrados por SILVA (2003) para o compósito de fibra de sisal e resina de mamona (0,25) e para o compósito de fibra de coco e resina de mamona (0,30).

A Figura 129 ilustra as curvas de tan delta para todos os materiais compósitos analisados. Em compósitos, este parâmetro de perda é influenciado pela incorporação, tipo e distribuição de fibras, bem como pela interação fibra/matriz e o teor de vazios (ALVEZ et al., 2004). Com o aumento da temperatura, $\tan \delta$ chega a um máximo na região vítrea e decresce na região elastomérica.

Abaixo da T_g , a conversão de energia é baixa porque, nesta região, os segmentos da cadeia estão congelados, as deformações são primariamente elásticas e o deslizamento das moléculas resultantes no fluxo viscoso é baixo. Portanto, grande parte da energia recebida por ciclo não é convertida em calor devido aos altos tempos de relaxação em comparação à escala de tempo do experimento. Também, na região elastomérica, os segmentos das cadeias são

livres para se mover resultando em uma conversão de energia mecânica, pois não há resistência ao fluxo (POTHAN et al., 2006). No entanto, na região de transição vítrea, o $\tan \delta$ é alto devido ao início da movimentação browniana dos segmentos das cadeias moleculares e da relaxação de tensão, mesmo que nem todos os segmentos participem juntos da relaxação (CORREA et al., 2007).

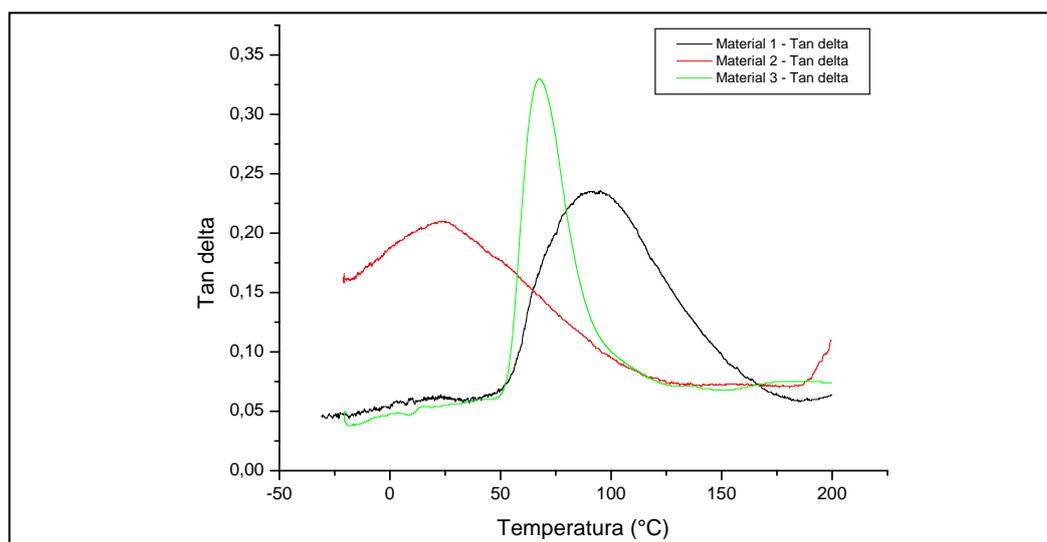


Figura 129 – Tan δ em função da temperatura para os materiais

Pela altura do pico de $\tan \delta$, tem-se uma estimativa da interface do compósito. Uma vez que a energia é dissipada pela interface, quanto mais forte a interface, menor é a dissipação de energia, resultando em uma menor altura do pico. Como as fibras suportam a maior parte da tensão, quanto mais fibra no compósito, menor é a parcela de energia dissipada como deformação. Também se pode ter uma idéia da adesão da fibra/matriz pela altura do pico. Uma menor altura representaria uma melhor adesão, pois há restrição aos movimentos moleculares (JÚNIOR, 2009). Assim, de acordo com o mostrado na Figura 129, o Material 3 apresentou uma interface mais fraca que as dos Materiais 1 e 2, ou seja, uma menor adesão fibra/matriz. Este fato também pode ser comprovado nas análises de MEV do Material 3 (item 4.2.5), especialmente na Figura 118, que ilustra o descolamento maciço de fibras da matriz, bem como a extração de fibras da mesma e por fim, fratura.

Ainda em relação à altura dos picos dos materiais compósitos analisados, é possível compará-los com valores de materiais compósitos existentes na literatura.

As alturas dos picos de $\tan \delta$ para o Material 1 (0,23) e para o Material 2 (0,21) foram menores que os encontrados por SILVA (2003) para o compósito de fibras de sisal e resina de mamona (0,25) e para o compósito de fibra de coco e resina de mamona (0,30). Esse comportamento parece indicar que as fibras de ubuçu apresentam uma boa adesão com as matrizes de PU, aparentemente melhor que as fibras de sisal e coco.

Outro dado a ser notado na Figura 129 é que a largura dos picos dos Materiais 1 e 2 é maior que a do Material 3, o que indica que este último material é mais homogêneo que os outros. JÚNIOR (2009) cita que quanto maior a largura, mais heterogêneo é o sistema e maior é a inibição ao processo de relaxação, ou seja, este alargamento pode ser atribuído a uma restrição/inibição do processo de relaxação de determinados segmentos de cadeia dos compósitos o que leva a uma distribuição mais larga do pico.

A Figura 130 ilustra as curvas para o módulo de armazenamento E' em função da temperatura, para os três materiais compósitos analisados. É observada a presença de uma tensão residual nos materiais 1 e 3 em aproximadamente 54°C . O valor de E' está diretamente relacionado com a capacidade de o material suportar cargas mecânicas com deformação recuperável, sendo análogo ao módulo de flexão (MOHANTY et al., 2006).

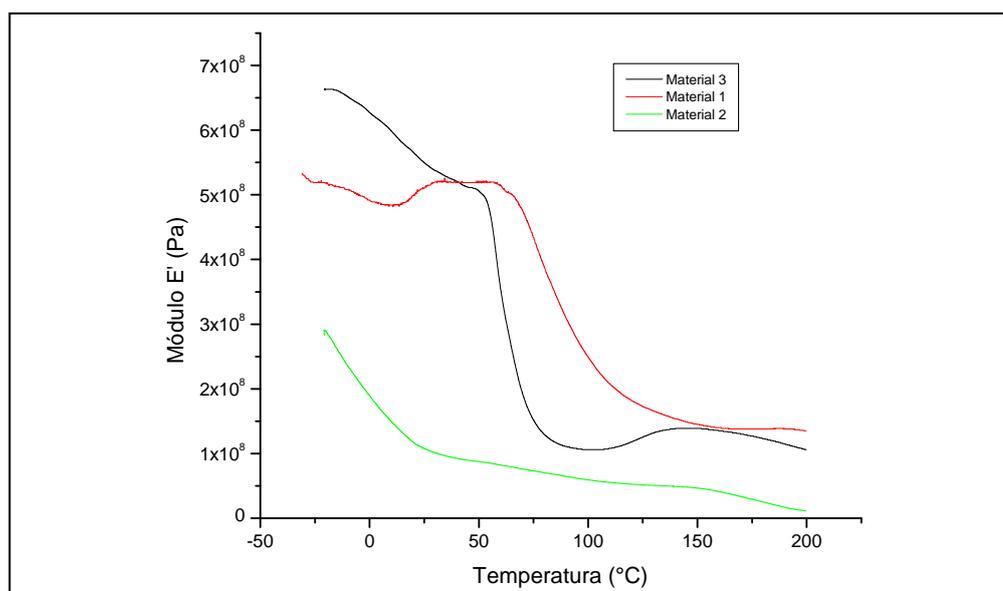


Figura 130 – Módulos de armazenamentos (E') encontrados para os materiais em função da temperatura

Conforme esperado, os compósitos apresentaram diminuição do módulo de armazenamento (E') com o aumento da temperatura. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da mobilidade molecular das cadeias poliméricas acima da T_g .

Como pode ser observado, a partir de 75°C para o Material 3 e a partir de 60°C para o Material 1, há queda acentuada do módulo de armazenamento, E' ; o que reflete a perda das propriedades elásticas em relação às características viscosas dos materiais. Essa temperatura também foi encontrada por SILVA (2003) para os compósitos de fibra de sisal e resina de mamona e fibra de coco com resina de mamona.

Quando ultrapassada a transição vítrea, tem-se uma matriz no estado borrachoso enquanto que as fibras de ubuçu mantêm a sua rigidez, pois só apresentam alguma mudança de comportamento com a temperatura a partir de aproximadamente 260°C , como visto no ensaio de TGA (item 4.1.3).

SILVA (2003) encontrou um valor do módulo de armazenamento para a resina de mamona de $1,8 \times 10^9$ Pa. Se utilizarmos este valor para comparar com o resultado obtido para o módulo de armazenamento do Material 1 (Tabela 14) é possível verificar que houve queda deste módulo. Este comportamento pode ser devido ao tipo da matriz de resina de mamona usada (na proporção de 1:1 de seus componentes).

A Figura 131 ilustra as curvas para o módulo de perda (E'') dos três materiais compósitos em função da temperatura. Foi identificado um pico por volta de 87°C para o Material 1 e de 60°C para o Material 3, já o Material 2 praticamente não apresentou picos em seu percurso. O Material 1 provavelmente apresentou uma melhor interação entre fibra e matriz do que o Material 3, visto que esse primeiro apresentou uma temperatura de transição vítrea maior, ou seja, é um material mais rígido que o Material 3. Assim, é possível afirmar que os Materiais 1 e 3 são mais rígidos e mais resistentes termicamente que o Material 2, que não apresentou picos de módulo de perda em seu percurso de análise, devendo-se tal comportamento à matriz de resina de mamona ser de natureza flexível se comparada com a do Material 1.

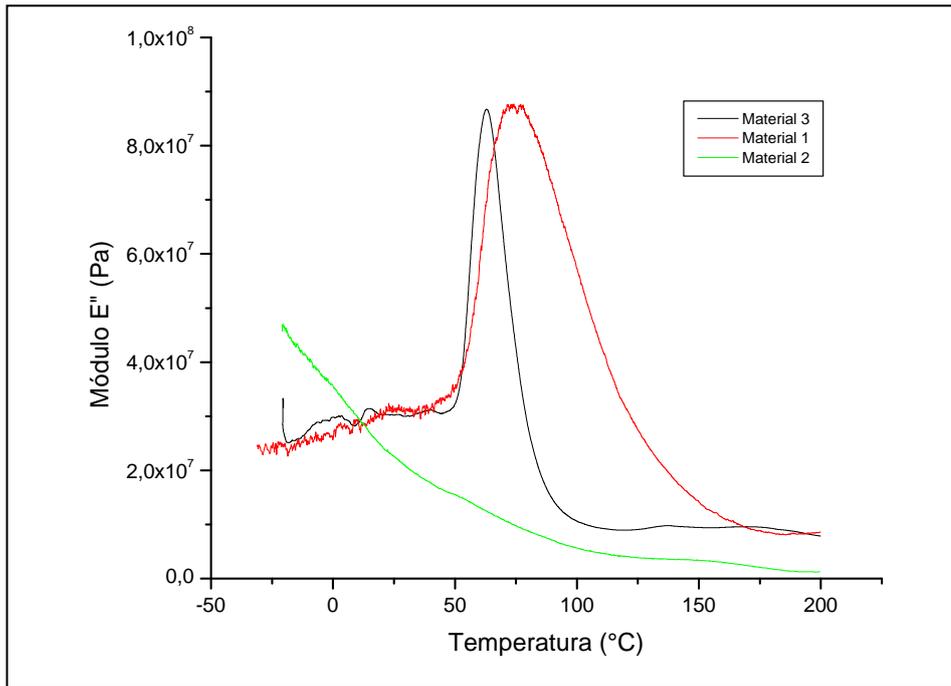


Figura 131 – Módulos de perda (E'') encontrados para os materiais em função da temperatura

4.2.8 Projeto de Design – Piso tururi mamona

Diante dos resultados apresentados e discutidos, e visando a confecção de um piso com material de fontes totalmente naturais e vegetais, escolheu-se para a fase de projeto de design o Material 1. De acordo com a metodologia do Design Industrial apresentada ao final do capítulo de Materiais e Métodos, são apresentados aqui os resultados de cada fase:

1. **Tema do projeto:** Com os dados do material em mãos procurou-se estudar a melhor forma de utilização do mesmo na fabricação de um piso de fabricação em escala industrial;
2. **Levantamento de dados:** Nesta fase foram pesquisadas informações a respeito de pisos em geral e principalmente sobre os principais tipos de pisos de madeira existentes no mercado, visando a aplicação do compósito na fabricação de um destes pisos. Assim, resumidamente, este tópico apresenta as seguintes informações sobre pisos, que servirão como material de apoio para o desenvolvimento do produto desenvolvido nesta tese.

2.1 Piso

De acordo com SILVA & BITTENCOURT (2003) define-se como piso uma superfície qualquer, contínua ou descontínua, construída com a finalidade de permitir o trânsito pesado ou leve.

Existem diversos fatores que se deve levar em conta na escolha de um piso, entre eles tem-se: Compatibilidade (o piso de um compartimento deve ser compatível com seu acabamento); Adequação (o pavimento de um ambiente deve ser apropriado ao ambiente) e Economia (leva-se em consideração o desgaste, a manutenção e a conservação do piso).

As qualidades que se deve exigir de um piso são: Resistência ao desgaste ao trânsito; apresentar atrito necessário ao trânsito; ser econômico; ter fácil conservação; apresentar inalterabilidade (cor, dimensão); ser decorativo.

2.2 Característica de um piso

SILVA & BITTENCOURT (2003) citam que pisos de residências e escritórios estão sujeitos a pequeno desgaste, enquanto os pisos industriais, a condições severas de trânsito e desgaste. Esse desgaste é devido principalmente a danos mecânicos, mas pode também ser acelerado por ataque químico.

Dessa forma, o piso a ser projetado nessa pesquisa será voltado para ambientes residenciais, por apresentar um trânsito menos severo que os pisos industriais. Assim, foram coletadas informações a respeito do desgaste em pisos residenciais.

Quando o desgaste é pequeno, como o que acontece com os pisos residenciais, a melhor proteção ao piso consiste numa demão de cera. Somente esta será removida. O desgaste desses pisos é grandemente acelerado por saliências, as quais podem ter sido ocasionadas por juntas mal executadas. Geralmente, os danos nos pisos são causados por grandes pesos (SILVA & BITTENCOURT, 2003).

2.3 Classificação de Pisos

AZEREDO (2006) cita que os pisos podem ser classificados de diversas maneiras, de acordo com suas propriedades físicas, em relação aos aspectos, as juntas, a permeabilidade, etc. Porém, neste trabalho, será considerada a classificação a partir do material, como observado no Quadro 9.

Quadro 9 – Classificação de Pisos (AZEREDO, 2006).

PISOS	Madeira	Assoalho, Tacos e Parquete	
	Ladrilhos Hidráulicos		
	Cerâmicos	Quadrado, Retangular, Sextavado e Cacos	
	Pedras	Naturais	Granito, Arenito e Mármore
		Artificiais	Granito, Arenito e Concreto
	Resinas		
	Vidro		
Fibra			

2.3.1 Assoalho

O assoalho é um piso de tábuas maciças com comprimentos variados e encaixe macho e fêmea (Figura 132). A instalação do piso é feita a partir de tábuas pregadas ou aparafusadas em cima de caibros de madeira dura e resistente, que ficam alinhados no contra piso e presos pela massa de cimento ao redor deles. As dimensões padronizadas para esse piso são: 10 cm x 2 cm x 1,5 a 5,5 m ou 15 cm x 2 cm x 1,5 a 5,5 cm (MADIPÊ Pisos de Madeira).

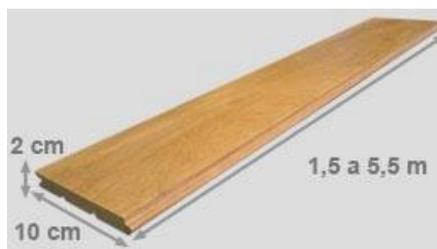


Figura 132 – Piso do assoalho de madeira (Madipê Pisos de Madeira)

2.3.2 Tacos

São peças retangulares de madeira com encaixe preferencialmente do tipo macho e fêmea (Figura 133). A instalação do piso consiste na colagem individual das peças sobre um contra piso de concreto bem alinhado. Geralmente são confeccionados com madeira de lei (ipê, pau-marfim e sucupira). Dimensões padronizadas encontradas no mercado, são 7 cm x 1,8 cm x 21 cm ou tacaõ, 10 cm x 2cm x 40 cm (MADIPÊ Pisos de Madeira).

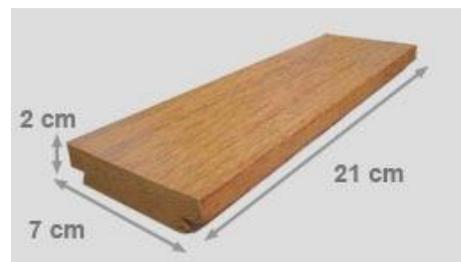


Figura 133 – Exemplo de piso do tipo taco (Madipê- Pisos de Madeira, 2011)

2.3.3 Parquet

É um piso elaborado a partir de pequenos pedaços de madeiras agrupados em placas quadradas. As peças são colocadas uma ao lado da outra sobre um contra piso de concreto bem alinhado (Figura 134).

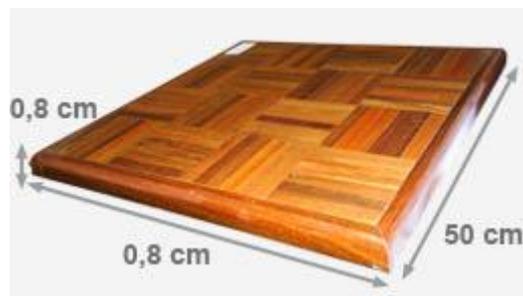


Figura 134 – Exemplo de piso do tipo parquet (Madipê- Pisos de Madeira, 2011)

De acordo com os tipos de pisos de madeira apresentados e levando-se em consideração as características de fabricação do compósito de fibra

de ubuçu e resina de mamona, os pisos que vão ao encontro desta idéia são os de taco e o parquet. Isso porque as dimensões desses tipos de pisos estão adequadas ao comprimento da folha de ubuçu (em média 60 cm). Diante dessa escolha pelo dimensionamento, será projetado um piso do tipo taco com o Material 1. O taco oferece uma série de acabamentos e estética, de acordo com o tipo de madeira utilizado e o sentido de aplicação de suas placas (Figura 135).

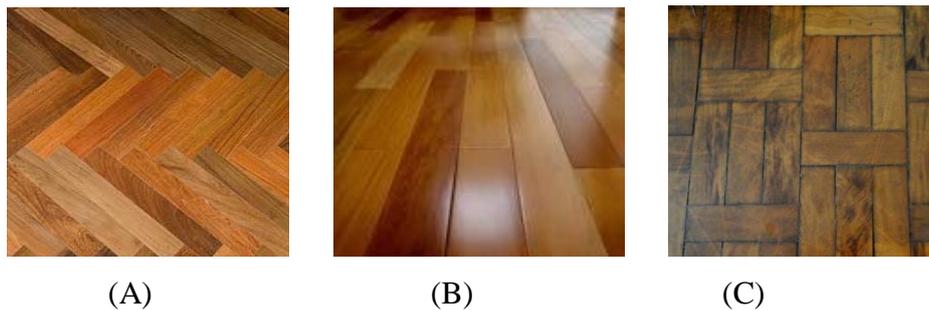


Figura 135 – (A) Espinha de peixe; (B) Tijolinho e (C) Quadrado (Madipê- Pisos de Madeira, 2011)

De acordo com a REVISTA CASA CLAUDIA (2001), o piso de taco está em tendência novamente, as madeiras de pinus e reflorestadas fazem com que esse tipo de piso seja procurado. A loja MADEIRA/MADEIRA (2011) cita que a grande vantagem dos tacos em relação ao assoalho, é que os tacos não precisam de barrotes (vigas, caibro ou uma peça em formato de trapézio de madeira que são fixadas no contra piso onde serão pregadas ou parafusadas as tábuas).

3. **Análise de dados:** Nesta fase foram levadas em consideração as informações a respeito do tipo de instalação para tacos de madeira e estas foram aplicadas ao universo de desenvolvimento do piso de taco do composto de fibra de ubuçu e resina de mamona.

3.1.1 Instalação do piso – Contrapiso

De acordo com a MADIPÊ (2011), o contrapiso deve ser preparado de cimento bem forte e desempenado, livre de

umidade. Deve secar por um período de 30 dias antes da instalação do piso de madeira. Para pisos no térreo deve-se tomar cuidado para fazer um contrapiso que não sofra infiltração de umidade, pois isto pode descolar as peças de madeira. A Figura 136 ilustra as etapas de construção do piso.



Figura 136 – Etapas para a instalação do piso de madeira – contrapiso (MADIPÊ).

3.1.2 Instalação do piso – Cola

Para o piso de taco de madeira comum, a cola utilizada deve ser a cola branca. Os produtos que utilizam cola na instalação são o parquet, tacho e taco. O assoalho é a única exceção, pois é fixado com parafusos.

Para este projeto, especificamente, o piso confeccionado com o Material 1 poderá ser colado tanto com cola branca quando com a própria resina de mamona na proporção 1:1 de seus componentes. Neste caso, a quantidade de cola ou resina a ser utilizada é em média de 1Kg para cada 1m² de piso. Após serem colados, os tacos deverão permanecer por no mínimo 15 dias para adaptação e secagem da cola, sendo estas recomendações de empresas reconhecidas no mercado por fabricarem e instalarem pisos de madeira. A Figura 137 ilustra o momento de instalação do piso do tipo taco da empresa MADIPÊ.



Figura 137 – Etapas para a instalação do piso de madeira – Piso de taco (MADIPÊ).

3.1.3 Acabamento do piso – Lixamento

O lixamento poderá ser feito no mínimo 15 dias após a conclusão da instalação. Quanto mais tempo esperar melhor, pois geralmente logo após a instalação, a madeira precisa se adaptar ao novo ambiente. Esse dado também pode ser levado em conta para a instalação do piso de compósito do Material 1, porém, serão necessárias algumas etapas de testes para confirmação deste prazo de espera. Nesta etapa de lixamento do piso, geralmente as empresas utilizam máquinas lixadeiras de disco grandes e pequenas lixadeiras para acabamento em cantos e locais de divisão com outros produtos. O equipamento utilizado atualmente não produz muita poeira, pois em torno de 80% é sugada pela máquina lixadeira. A Figura 138 ilustra o uso da lixadeira grande e de lixadeiras menores para os cantos do piso de madeira.



Figura 138 – Máquinas lixadeiras grandes e portáteis para dar acabamento ao piso de taco (MADIPÊ)

3.1.4 Acabamento do piso – Pintura

A pintura é a última etapa do processo, sendo feita após o lixamento. Para pisos de madeira, as empresas geralmente utilizam duas camadas de sinteco e uma de verniz para dar brilho, com intervalo de 6 horas entre uma aplicação e outra. Após as aplicações, os ambientes devem permanecer fechados por um dia para ficarem protegidos de poeira e outras sujeiras. Após 2 dias o piso está liberado para ser pisado, antes disso pode estragar a pintura.

Desta forma, a resina de mamona sugerida para o acabamento final do piso de taco formado pelo Material 1 é a RESCON 301 produzida pela PROQUINOR (Produtos Químicos do Nordeste). Esta resina é utilizada na impermeabilização de pisos, sendo atóxica, fácil de aplicar, a frio, podendo-se usar espátulas, pincéis ou rodos. Por serem isentos de solventes, os sistemas RESCON não liberam gases tóxicos prejudiciais ao aplicador.

4. **Projeto de Design:** Tem como objetivo projetar o piso tendo em vista as informações anteriormente citadas. Desta forma, as atenções foram fixadas no melhor aproveitamento da fibra e da resina, o processo de fabricação, desenvolvimento do encaixe macho e fêmea e na forma de instalação futura do piso.

Tendo em mente as dimensões dos tacos de madeira, optou-se por se projetar tacos do compósito com dimensões de 6 cm de largura, 1,2 cm de espessura e 28 cm de comprimento. Esse dimensionamento foi pensado levando-se em conta o melhor aproveitamento da fibra, já que a folha de ubuçu terá suas extremidades descartadas e apresentará uma área útil média de 64 cm de comprimento e 26 cm de largura de acordo com o esquema da Figura 139.



Figura 139 – Esquema da área útil da folha de ubuçu a ser aproveitada

Para obter a espessura de 1,2 cm, serão necessárias 12 folhas de ubuçu, que serão prensadas conforme procedimento anteriormente descrito para a fabricação das placas de compósitos. Com as folhas abertas, obtêm-se um retângulo de 64 cm de comprimento por 26 de largura, sendo essas dimensões a serem consideradas quando do momento de fabricação do molde metálico para ser prensado na prensa hidráulica. Na Figura 140 é possível observar que com esse dimensionamento é possível fabricar seis tacos por vez, direcionando assim a produção para que se obtenha o maior número de peças por bloco de compósito prensado.

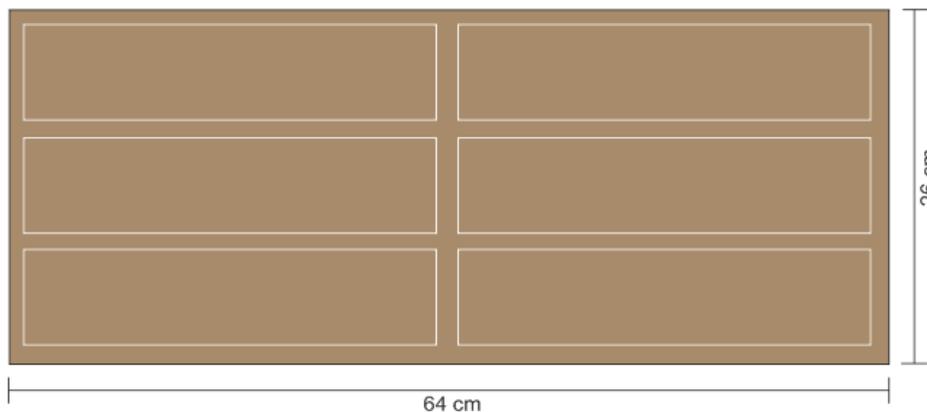


Figura 140 – Esquema do bloco de compósito prensado e fabricação de seis peças de tacos por vez

Após a prensagem desse bloco de compósito, os equipamentos a serem utilizados para se fabricar os tacos serão os comumente utilizados em marcenarias, ou seja: serra de fita, serra de disco, tupia, lixadeira de bancada, entre outros que perfeitamente se adequam ao trabalho com o compósito.

A Figura 141 ilustra o esquema do taco projetado. A peça consiste em um retângulo com encaixes (rebaixes, na imagem colorido de azul) realizados na máquina conhecida por tupia ou na serra de disco. Este encaixe se apresenta como facilitador na hora da montagem do piso, já que somente uma peça é necessária para compor toda a área. Os outros pisos apresentam ao menos duas peças para encaixar e compor a área. O desenho técnico consta no anexo desta tese.

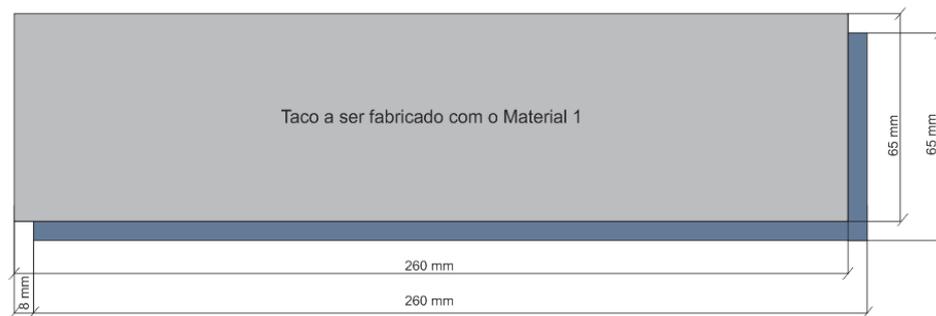


Figura 141 – Esquema do taco projetado com o Material 1

A Figura 142 ilustra as vistas laterais do taco projetado, podendo-se observar que a construção da peça é razoavelmente simples, com facilidade de encaixe. As Figuras 143 e 144 ilustram o esquema de funcionamento do encaixe macho e fêmea.

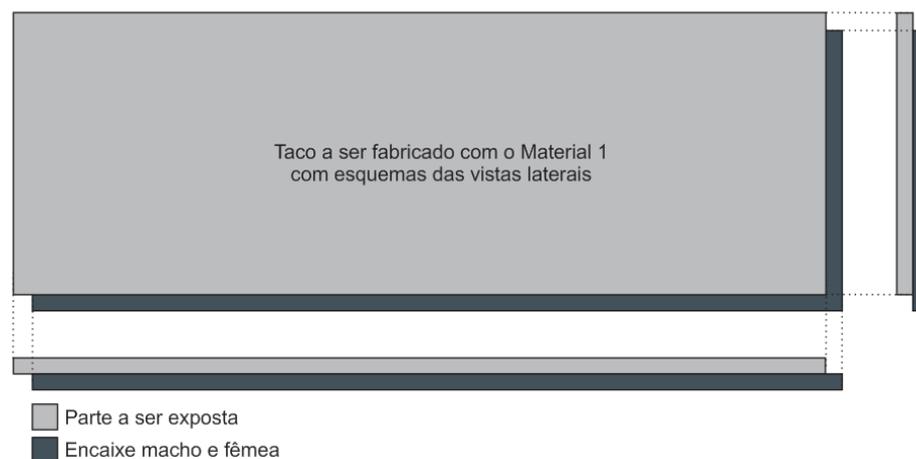


Figura 142 – Esquema do taco projetado com as vistas laterais



Figura 143 – Esquema de encaixe do taco projetado (vista de topo)

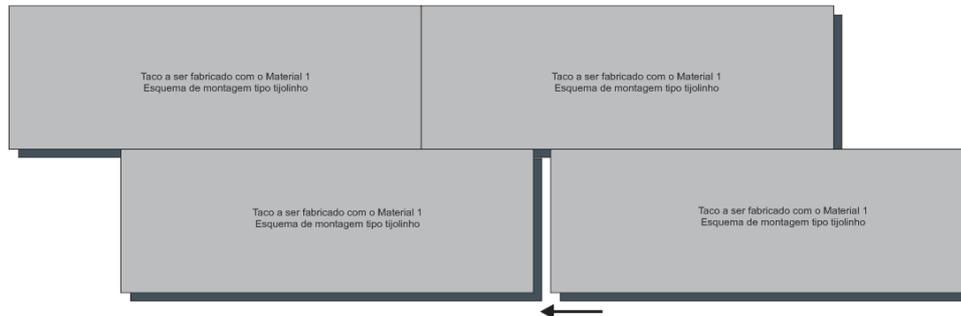


Figura 144 – Esquema de encaixe do taco projetado (vista de frente)

A Figura 145 mostra que com a peça projetada é possível formar os três arranjos anteriormente citados para a instalação, ou seja, espinha de peixe, tijolinho e quadrado. A Figura 146 ilustra duas peças de taco projetado em perspectiva.

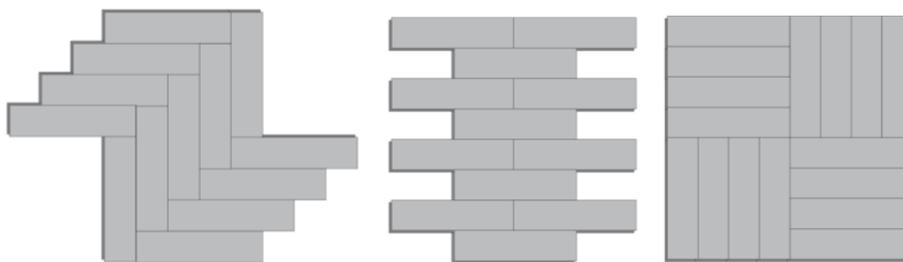


Figura 145 – Esquemas de montagens possíveis para o taco projetado (vista de frente)

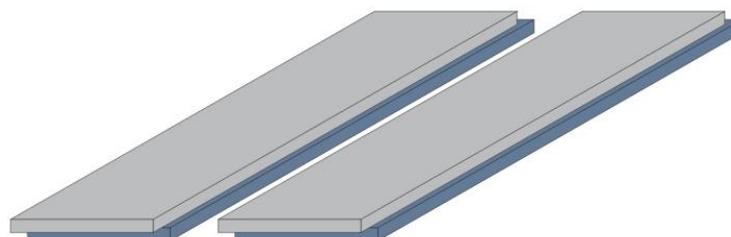


Figura 146 – Perspectiva do taco projetado

5. Construção de modelos, mock-ups e protótipos para validar as idéias até então concebidas:

Nesta fase foi realizada a fabricação das peças de taco em uma marcenaria, onde se optou por uma tecnologia de fabricação mais simples possível, optando-se por utilizar a serra de disco para cortar a placa e fazer o rebaixe do encaixe macho e fêmea. Dessa forma, a primeira etapa realizada foi a de cortar as placas do compósito na serra de disco (Figura 147). Após o corte básico, com a mesma serra de disco, os tacos receberam o encaixe macho e fêmea com um rebaixe de 5 mm em dois de seus lados e de maneira oposta (Figura 148A e 148B). Para isso, o disco de serra foi abaixado para que sua altura não ultrapassasse 5 mm. Ao final, os tacos recebiam o acabamento em lixadeira de bancada.



Figura 147 – Corte das placas de compósito na serra de disco



Figura 148 – Detalhe da feitura do encaixe macho e fêmea no taco

6. Construção do protótipo para apresentação:

Após as etapas anteriormente descritas, o protótipo da peça de taco ficou pronto. É preciso frisar que a tecnologia empregada foi sugerida como uma simplificação de etapas, de modo a tornar o processo de fabricação o mais acessível possível. Outro detalhe a ser lembrado, é que as dimensões do taco aqui apresentadas estão relacionadas com as dimensões do molde metálico utilizado na pesquisa, que é menor do que o projetado nesta parte de design. Ou seja, para agilizar a produção, seria necessário a construção de um molde metálico maior, de forma a proporcionar a produção de seis tacos por vez, como mostrado na Figura 141. As Figuras 149 e 150 ilustram as peças de taco fabricadas. Já as Figuras 151, 152 e 153 ilustram as possíveis configurações formais para o piso de taco projetado.



Figura 149- Peça de taco fabricada com o Material 1



Figura 150 – Peça de taco em perspectiva



Figura 151 – Configuração “tijolinho”



Figura 152 – Configuração “espinha de peixe”



Figura 153 – Configuração “quadrado”



Figura 154 – Empilhamento das peças de taco para futura embalagem e transporte.

A Figura 154 ilustra a forma de empilhamento para que as peças sejam armazenadas em embalagem e serem transportadas. Como material para embalagem sugere-se o cartão Kraft por ser resistente e reciclável, além de apresentar aspecto estético de cor e textura parecida com a do taco. Outro material também sugerido para embalagem é o papel ondulado, mais conhecido como corrugado, também chamado de papelão, embora o termo não seja tecnicamente correto. Este material já é usado em caixas para transporte de produtos para fábricas, depósitos e residências. O consumo de papel ondulado em 2000 foi de 1,7 milhão e 72% do

volume consumido no Brasil é reciclado, sendo um dos materiais que mais se recicla no Brasil (Fonte: www.reviverde.org.br).

7. Desenvolvimento de Identidade Visual:

Esta parte contém a logomarca ou logotipo desenvolvido para o produto, descrição das cores em sistemas RGB e CMYK, uso da logomarca em diferentes mídias impressas, eletrônicas e em embalagens.

Logomarca – Esta é a logomarca do “piso tururi mamona”, material resultante de pesquisa de doutorado realizado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais. Ela tem como elemento central o logotipo com o nome do produto, circundado por uma forma estilizada da placa do piso (um retângulo com suas extremidades arredondadas). O logotipo possui a palavra “piso” em tom de verde, exatamente para representar a sua origem, ou seja, de fontes vegetais. Lendo-se cada palavra, a intenção do logotipo é especificamente de demonstrar que o material é um composto de fibra de tururi e resina de mamona, que no final, formam um piso. No canto superior direito, o logotipo é acompanhado por três folhas verdes (símbolo) que representam explicitamente que o material é ecológico, de fontes vegetais (plantas), também na cor verde, como o logotipo “piso”. A idéia central é apresentar o produto “piso tururi mamona” como um material ecológico e neutro, por isso também o uso das cores verde e cinza (neutro). Seu uso será sempre na direção horizontal e as três folhas serão utilizadas como sinalização e identificação do material, podendo ser utilizadas isoladamente (Figura 155).

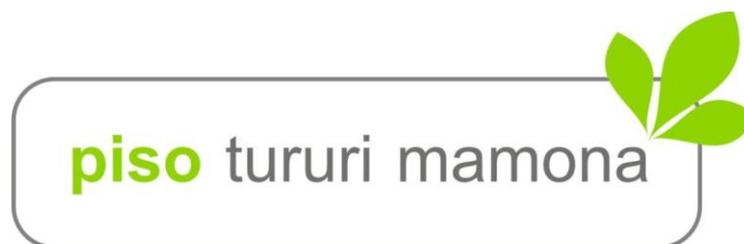


Figura 155 – Logomarca criada para o piso de taco do Material 1

Escala de cores - Em um Manual de Identidade é preciso descrever as cores que formam a logomarca criada na escala Pantone e sistemas RGB e CMYK, para que as aplicações em mídias eletrônicas e impressas respeitem as cores formadoras da imagem, criando uma padronização da marca (Figura 156).



Figura 156 – Cores em escala Pantone e Sistemas CMYK e RGB

Tipografia – É usada na marca e em textos auxiliares, como bloco de textos e elementos de papelaria. A família adotada é a Futura Md BT e suas variações: Bold.



Versão Preto/Branco e Tons de Cinza – Tais versões serão utilizadas em caso de fax, papelaria monocromática (cinza e preto) e em embalagens nas cores branca, preta e em tons de ocre (papelão

ondulado). A Figura 157 ilustra a logomarca com todos os seus elementos em preto (C100/M100/Y100/K100), RGB (R10/G11/B12). A Figura 158 ilustra a logomarca em tons de cinza e preto.

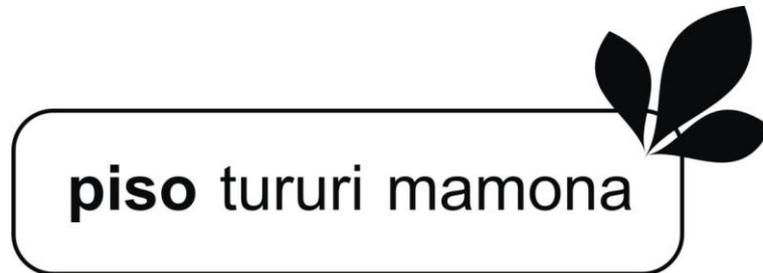


Figura 157 – Logomarca em Preto

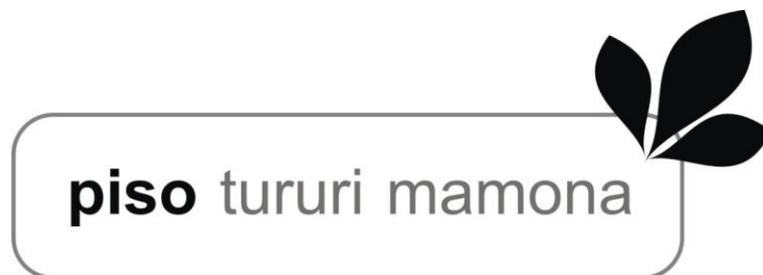


Figura 158 – Logomarca em tons de cinza e preto

Estudo de padronização da logomarca em fundos de cores diferentes

– O objetivo desta fase é estudar a padronização da logomarca em fundos com cores diversas. Nesta pesquisa, recomenda-se o uso da logomarca em suas cores originais em fundos de cores branca e preta, já que tais cores proporcionam melhor contraste, legibilidade e rápida assimilação por parte dos consumidores. Como se pode observar, os fundos de cores branca e preta (Figura 159A e 159B) apresentam as melhores opções para uso da logomarca em suas cores originais. Já para o uso da logomarca em preto e tons de cinza, as melhores de cores de fundos são o ocre (papelão) e o branco (Figura 159C e 159D). Esses estudos demonstram que a logomarca funciona em fundos com cores branca, preta e ocre, proporcionando boa visibilidade, contraste e assimilação da logomarca na mente dos consumidores.

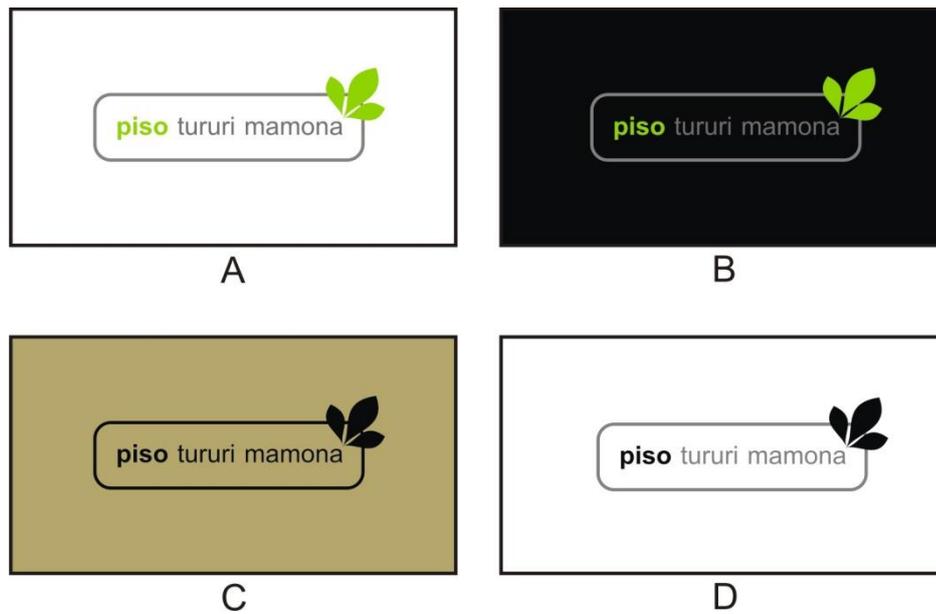


Figura 159 – Estudos de cores de fundo para a logomarca

8. Apresentação Final.

A Figura 160 ilustra o piso de taco com a logomarca.

9. Produto selecionado para a Exposição do 24° Prêmio de Design Museu da Casa Brasileira:

O piso “tururi mamona” foi selecionado para a Exposição do 24° Prêmio de Design Museu da Casa Brasileira, sendo este evento um dos mais importantes no ramo do design de produtos. Na categoria “Protótipo Equipamento Construção” o piso “tururi mamona” foi selecionado em primeiro lugar, conforme informa o site do evento: <http://www.mcb.sp.gov.br>. Dentre importantes empresas que também participaram e foram selecionadas para exposição estão: Deca, Siemens, Mabe, Faro Design, Cônsul, entre outras.



Figura 160 – Piso “tururi mamona” com a logomarca

4.2.9 Análise de Ciclo de Vida - ACV

A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) está sendo empregada na análise dos aspectos ambientais e avaliação dos impactos potenciais associados ao ciclo de vida do produto “piso tururi mamona”. Este estudo é algo demorado, requer a análise de vários tópicos envolvendo a coleta de material, tratamento do material, processo de fabricação, embalagem, transporte e distribuição. Todas essas etapas demandam gasto de energia e seu estudo pode ser feito com ferramentas como o software GaBi 4.0, como anteriormente citado na revisão bibliográfica. Esta ferramenta de ACV permite analisar o ciclo de vida desde a extração de matérias-primas, passando pelas etapas de transporte, produção, distribuição e utilização, até sua destinação final (do berço ao túmulo), e esse estudo torna possível compreender o impacto ambiental de um produto como o piso aqui projetado. Porém esta tarefa demanda um tempo maior, algo que não foi possível terminar nesta tese, porém, alguns resultados preliminares já podem ser descritos:

- O uso das fibras de ubuçu na fabricação de um compósito resulta em menor impacto ambiental se comparadas com as fibras de vidro, por exemplo;
- O uso da resina de mamona como matriz polimérica reduz o impacto ambiental (já que não é de fonte petrolífera) e ajuda na geração de renda, fixando o homem no campo;
- Na fase de cultivo, tanto a palmeira de ubuçu quanto a mamona seqüestram o CO₂ da atmosfera o que contribui com uma cultura verde.