

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1. Compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu (CPB)

6.1.1. Análise mecânica

6.1.1.1. Impacto

Através da tabela 6.1 pode-se verificar os resultados dos ensaios de impacto Charpy obtidos para os corpos-de-prova CP0, CPB e CPBS . Nota-se que no ensaio de impacto Charpy houve um incremento na tenacidade de 46,6 %, em relação a matriz sem reforço.

Tabela 6.1 - Resultados do ensaio de impacto Charpy para CP0, CPB e CPBS. (Ensaio realizado após 3 meses de exposição ao ar).

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,35±0,11	0,31±0,05	0,05±0,01	0,45 ± 0,09
CPB8T	0,4±0,12	0,49±0,24	0,07±0,01	0,65 ± 0,09
CPB8C	0,3±0,12	0,61±0,20	0,07±0,01	0,59 ± 0,08
CPB14T	0,16±0,06	1,21±0,3	0,07±0,01	0,66 ± 0,09
CPB14C	0,16±0,06	1,21±0,3	0,06±0,01	0,57 ± 0,13
CPBS8T	0,3±0,08	0,24±0,06	0,06±0,01	0,58±0,08
CPBS8C	0,22±0,07	0,33±0,08	0,07±0,01	0,59±0,08
CPBS14T	0,11±0,01	0,48±0,17	0,07±0,01	0,58±0,06
CPBS14C	0,11±0,05	0,47±0,19	0,07±0,01	0,54±0,06

Quando comparado os lados em que há maior concentração de fibras tracionadas (CPBT) em relação ao lado com menor concentração (CPBC) nota-se uma tendência a um melhor comportamento do primeiro. Para as duas concentrações de fibras estudadas, 8% e 14%, não se nota um incremento na tenacidade em função do teor de fibras. Este fato pode ser explicado pelas seguintes hipóteses:

1 – Processo de fabricação: Quando observado no MEV notou-se em várias amostras uma aglomeração de fibras, como pode ser visto na figura 6.1. Tais aglomerações são consequência de uma má dispersão das fibras durante o processo de fabricação. Este fato pode ter gerado, para o compósito CPB14, uma tenacidade abaixo da esperada, pois nem todas as fibras estavam em contato direto com a matriz.

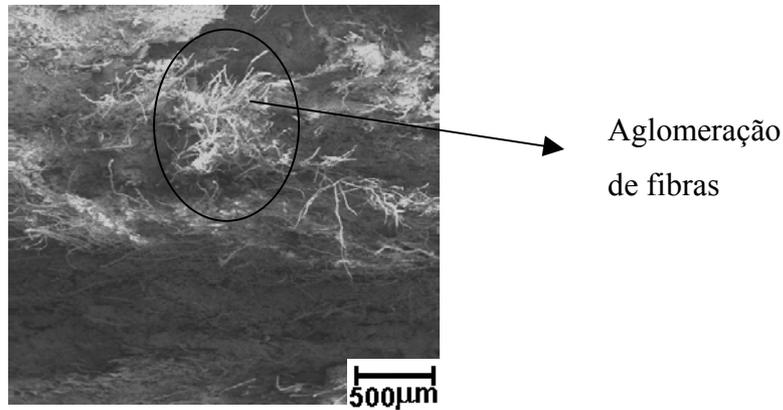


Figura 6.1 – Compósito CPB14 fraturado após ensaio de impacto.

2 – Tamanho das fibras abaixo do comprimento crítico: O cálculo do comprimento crítico das fibras está diretamente ligado à tensão interfacial da fibra. Para o cálculo do comprimento crítico (L_c) foi utilizada a equação 6.1:

$$L_c = \frac{\sigma_t d}{2\tau} \quad (6.1)$$

onde,

d = diâmetro da fibra

σ_t = resistência à tração da fibra

τ = tensão de adesão interfacial

Para o cálculo da tensão interfacial foi utilizado o método proposto por Swamy e Mangat (1974). Neste trabalho foi deduzida uma equação para o cálculo do módulo de ruptura em compósitos reforçados por fibras distribuídas aleatoriamente e que falhem por arrancamento. A equação para o cálculo do módulo de ruptura é a seguinte:

$$\sigma_{cf} = \sigma_m V_m + 0,82\tau \frac{l}{d} V_f \quad \text{ou} \quad \frac{\sigma_{cf}}{V_f(l/d)} = \frac{\sigma_m(1-V_f)}{V_f(l/d)} + 0,82\tau \quad (6.2)$$

Através desta formulação o resultado experimental $\frac{\sigma_{cf}}{V_f(l/d)}$ é plotado contra $\frac{\sigma_m(1-V_f)}{V_f(l/d)}$ e uma linha é traçada entre os pontos através de uma análise de regressão linear. Através da equação da reta são obtidos os fatores de ajuste da equação. O ponto de interseção da reta com o eixo y será $0,82\tau$, possibilitando assim o cálculo da tensão de adesão na interface fibra matriz e o posterior cálculo do comprimento crítico. Foram feitos cálculos para a tensão interfacial e comprimento crítico para todos os compósitos estudados neste trabalho, como mostrado a seguir para os compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu.

Compósito CPB8T

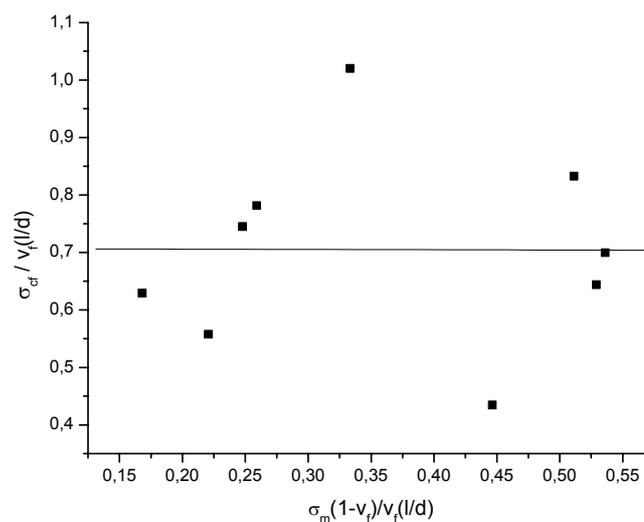


Figura 6.2 – Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB8T.

Dessa maneira a equação 6.2 toma a seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = -0,00524\sigma_m(1 - V_f) + 0,70687V_f(l/d) \quad (6.3)$$

Possibilitando assim o cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,70687 \Rightarrow \tau = 0,86MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 4,91 \text{ mm.}$$

Compósito CPB8C:

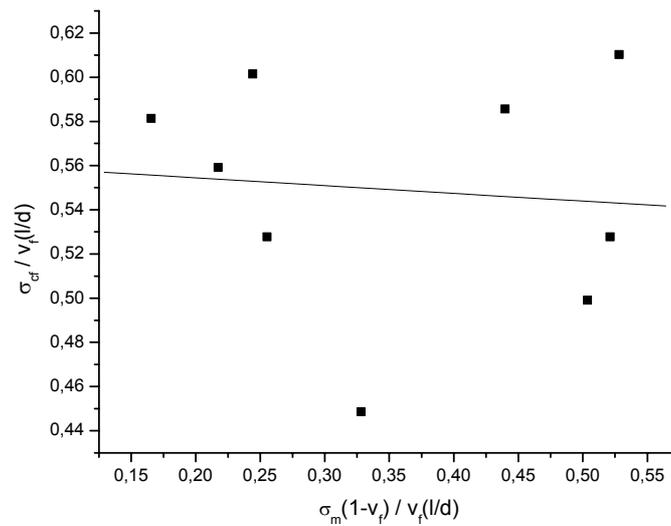


Figura 6.3 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB8C.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = -0,03157\sigma_m(1 - V_f) + 0,56153V_f(l/d) \quad (6.4)$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,56153 \Rightarrow \tau = 0,68MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 6,22 \text{ mm.}$$

Compósito CPB14T:

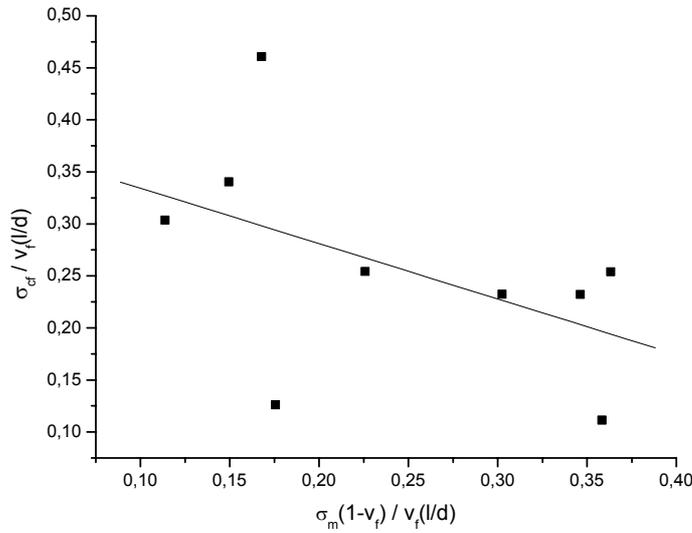


Figura 6.4 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB14T.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = -0,53256\sigma_m(1 - V_f) + 0,38756V_f(l/d) \tag{6.5}$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,38756 \Rightarrow \tau = 0,47MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 9 \text{ mm.}$$

Compósito CPB14C:

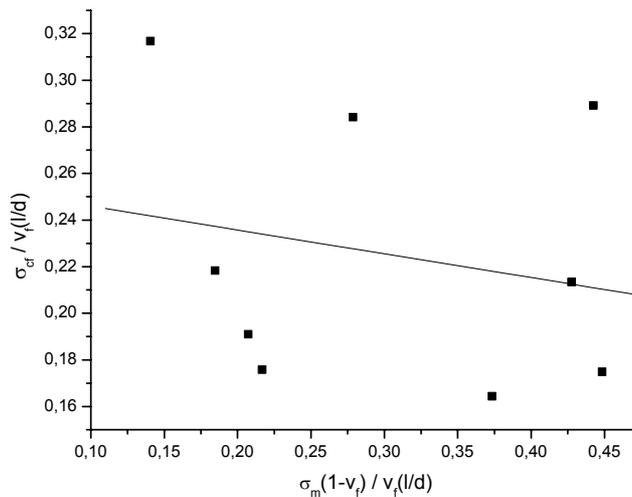


Figura 6.5 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB14C.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = -0,10204\sigma_m(1 - V_f) + 0,25612V_f(l/d) \quad (6.6)$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,25612 \Rightarrow \tau = 0,31MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 13,64 \text{ mm.}$$

Compósito CPB8T (ensaio após 1 mês, 1ª série):

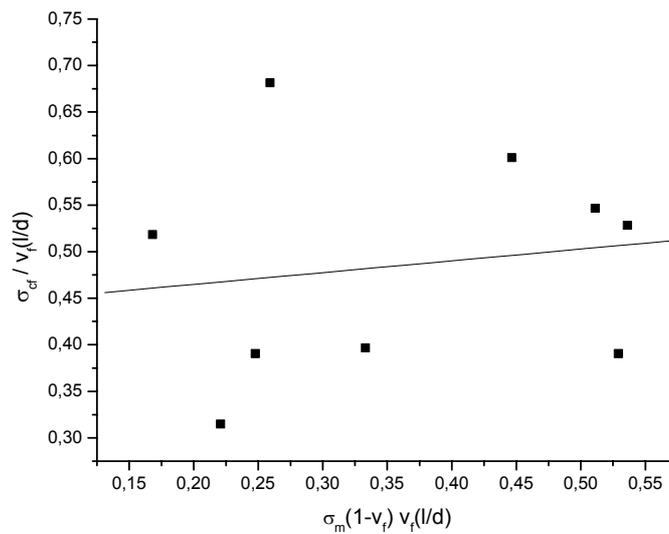


Figura 6.6 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB8T.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = 0,12668\sigma_m(1 - V_f) + 0,43953V_f(l/d) \quad (6.7)$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,43953 \Rightarrow \tau = 0,53MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 7,98 \text{ mm.}$$

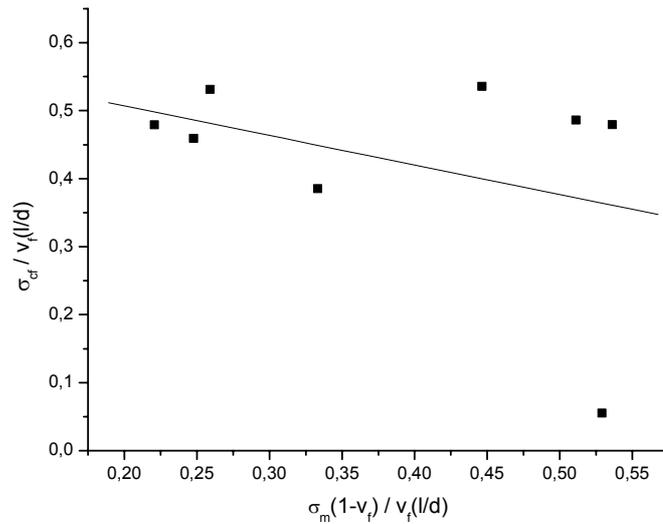
Compósito CPB8C (ensaio após 1 mês, 1ª série):

Figura 6.7 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB8C.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = -0,43437\sigma_m(1-V_f) + 0,5939V_f(l/d) \quad (6.8)$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,5939 \Rightarrow \tau = 0,72 \text{ MPa} \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 5,87 \text{ mm.}$$

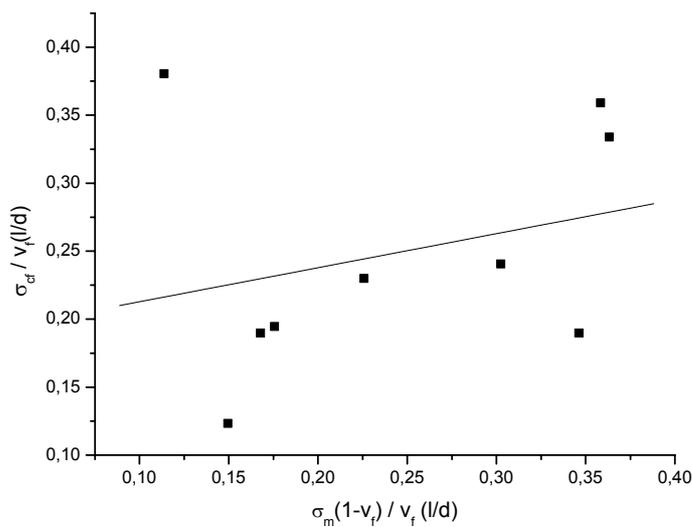
Compósito CPB14T (ensaio após 1 mês, 1ª série):

Figura 6.8 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB14T.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = 0,25051\sigma_m(1 - V_f) + 0,1877V_f(l/d) \quad (6.9)$$

Cálculo de τ e L_c :

$0,82\tau = 0,1877 \Rightarrow \tau = 0,22MPa$ e através da equação 6.1, $L_c = 19,22$ mm.

Compósito CPB14C (ensaio após 1 mês, 1ª série):

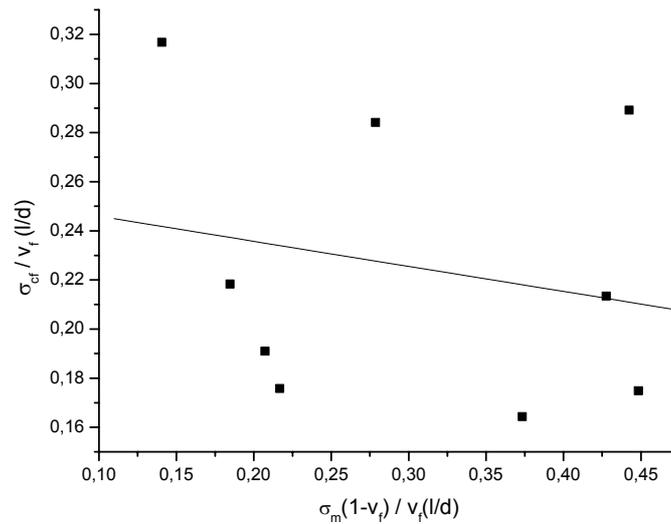


Figura 6.9 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB14C

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = -0,10204\sigma_m(1 - V_f) + 0,25612V_f(l/d) \quad (6.10)$$

Cálculo de τ e L_c :

$0,82\tau = 0,25612 \Rightarrow \tau = 0,31MPa$ e através da equação 6.1, $L_c = 13,64$ mm.

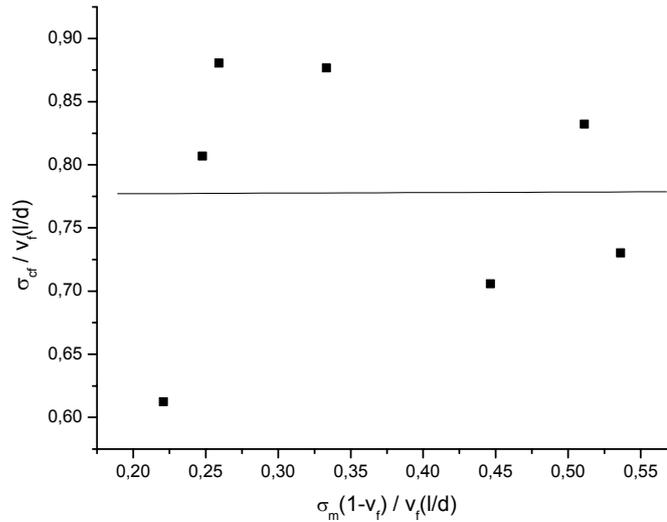
Compósito CPB8T (ensaio após 1 mês, 2ª série):

Figura 6.10 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB8T.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = 0,00401\sigma_m(1 - V_f) + 0,77636V_f(l/d) \quad (6.11)$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,77636 \Rightarrow \tau = 0,94MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 4,5 \text{ mm.}$$

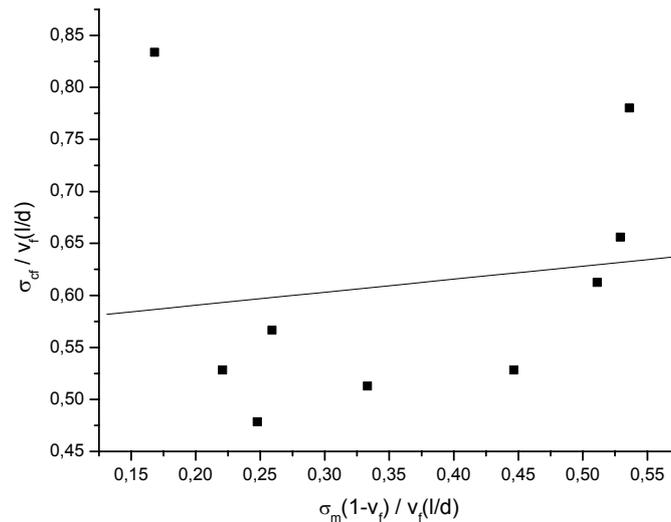
Compósito CPB8C (ensaio após 1 mês, 2ª série):

Figura 6.11 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB8C.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = 0,12519\sigma_m(1 - V_f) + 0,56553V_f(l/d) \quad (6.12)$$

Cálculo de τ e L_c :

$0,82\tau = 0,56553 \Rightarrow \tau = 0,69MPa$ e através da equação 6.1, $L_c = 6,1$ mm.

Compósito CPB14T (ensaio após 1 mês, 2ª série):

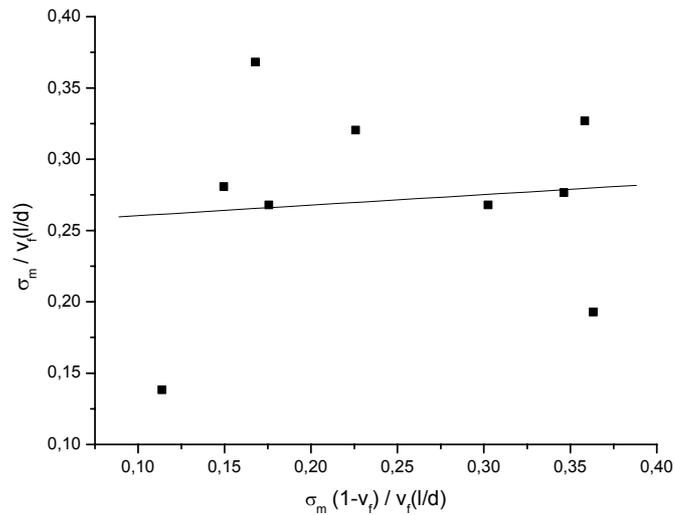


Figura 6.12 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB14T.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = 0,07362\sigma_m(1 - V_f) + 0,25309V_f(l/d) \quad (6.13)$$

Cálculo de τ e L_c :

$0,82\tau = 0,25309 \Rightarrow \tau = 0,30MPa$ e através da equação 6.1, $L_c = 14,1$ mm

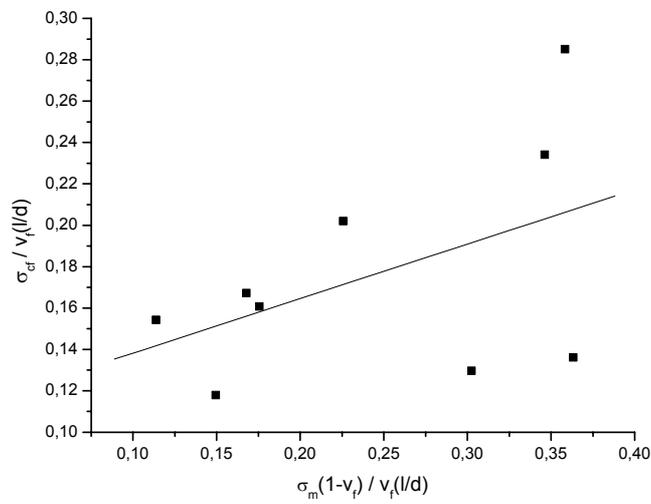
Compósito CPB14C (ensaio após 1 mês, 2ª série):

Figura 6.13 - Determinação da equação do módulo de ruptura para o CPB14C.

A equação 6.2 fica da seguinte forma:

$$\sigma_{cf} = 0,26353\sigma_m(1 - V_f) + 0,11187V_f(l/d) \quad (6.14)$$

Cálculo de τ e L_c :

$$0,82\tau = 0,11187 \Rightarrow \tau = 0,13MPa \text{ e através da equação 6.1, } L_c = 32,53 \text{ mm}$$

A partir destes resultados é apresentado na tabela 6.2 o resumo dos valores para os comprimentos críticos da polpa de bambu.

Tabela 6.2 – Resultados de comprimento crítico e tensão interfacial do CPB.

Compósito	L_c (mm)	τ (MPa)
CPB8T (ensaio após 3 meses)	4,9	0,86
CPB8C (ensaio após 3 meses)	6,2	0,68
CPB14T (ensaio após 3 meses)	9,0	0,47
CPB14C (ensaio após 3 meses)	13,6	0,31
CPB8T (ensaio após 1 mês, 1ª série)	7,9	0,53
CPB8C (ensaio após 1 mês, 1ª série)	5,8	0,72
CPB14T (ensaio após 1 mês, 1ª série)	19,2	0,22
CPB14C (ensaio após 1 mês, 1ª série)	13,6	0,31
CPB8T (ensaio após 1 mês, 2ª série)	4,5	0,94
CPB8C (ensaio após 1 mês, 2ª série)	6,1	0,69
CPB14T (ensaio após 1 mês, 2ª série)	14,1	0,30
CPB14C (ensaio após 1 mês, 2ª série)	32,5	0,13

Observa-se através dos resultados expostos na tabela 6.2 que a tensão interfacial diminui com o aumento do volume de fibras. Isto pode estar acontecendo pois, como o processo de dispersão das fibras não é perfeito, para compósitos com maior quantidade de fibras acontece a formação de aglomerações, conforme mostrado na figura 6.1. Sendo assim constata-se que para compósitos CPB8 o comprimento crítico varia de 4,5 mm a 7,98 mm. Andonian et al. (1979) sugerem que o valor da tensão interfacial para fibras celulósicas está entre 0,35 e 0,45 MPa. Utilizando os valores da tensão interfacial calculados por Andonian et al.(1979), o comprimento crítico das fibras utilizadas neste trabalho estaria entre 9,4 e 12 mm, faixa de valor esta, a qual está um pouco superior ao encontrado para o CPB8. Já para os compósitos CPB14, a variação do comprimento crítico ocorre entre 9 e 32,53 mm. Se o valor para o CPB14C de 32,53 mm, que está bem acima dos outros resultados, for desprezado tem-se uma faixa de resultado muito mais coerente. Esta faixa de resultados estaria entre 9 e 19,22 mm a qual é muito próxima aos resultados obtidos levando em conta as tensões interfaciais encontradas por Andonian et al.(1979) (9,4 a 12 mm). Pode-se

concluir que o comprimento crítico da polpa de bambu é superior ao comprimento da polpa empregada, o qual varia de 1 a 3 mm. Dessa forma a hipótese 2 está comprovada, pois o comprimento da polpa de bambu utilizado está abaixo do comprimento crítico. Dessa forma, as fibras estão sendo arrancadas antes de absorver toda a tensão a qual teriam capacidade de suportar. Este fato compromete de forma direta a performance do compósito no que diz respeito a capacidade de absorção de energia, ou seja, a sua tenacidade.

3 – Elevada taxa de deformação do ensaio de impacto: Uma elevada taxa de deformação pode influenciar na capacidade do material em absorver energia. A metodologia utilizada neste trabalho para o cálculo da taxa de deformação é baseada na mecânica do contínuo, tendo sido utilizada também nas pesquisas de Land (1979) e Williams e Hodgkinson (1981). A equação geral do modelo é:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{2h(N+2)}{(L-a)[L+a(N+1)]} y_L \quad (6.15)$$

onde h = espessura, L = vão externo, a = vão interno, N = fator de fluência e Y_L = deflexão. Para um ensaio de flexão em 3 pontos e um material deformado elasticamente: $a = 0$ e $N = 1$, resultando em :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{6h}{L^2} y_L = \frac{6h}{L^2} Vt \quad (6.16)$$

Derivando a equação 6.16 em relação ao tempo tem-se:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{6h}{L^2} V \quad (6.17)$$

onde, t = tempo e V = velocidade.

Da equação 6.17 pode-se calcular a taxa de tensão como mostrado a seguir:

$$\dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon} \quad (6.18)$$

Utilizando a equação 6.17 foi calculada a taxa de deformação. Para o ensaio de impacto Charpy foi obtido o valor de $14,4 \text{ s}^{-1}$ enquanto que para o ensaio de flexão em 3 pontos o resultado foi de $0,126 \text{ s}^{-1}$. Tem-se então para o ensaio de impacto uma taxa de deformação duas ordens de grandeza acima da utilizada no ensaio de flexão. Este fato pode estar influenciando na capacidade do compósito em absorver energia, resultando em comportamentos muito próximos para diferentes concentrações de fibras.

4 – Pequena tensão de adesão interfacial fibra-matriz: Como visto na tabela 6.2, para o compósito CPB8 há uma variação na tensão de adesão interfacial de 0,53 a 0,94 MPa e para o CPB14 de 0,13 a 0,47 MPa. Andonian et al. (1979) acharam em seu trabalho que a tensão interfacial estaria entre 0,35 e 0,45 MPa, faixa de valor esta que está bem próxima a do CPB14. Entretanto, é mais provável que para a polpa de bambu a tensão interfacial esteja situada na faixa de 0,53 a 0,94 MPa. Isto ocorre pois para o CPB8 as fibras estavam melhor dispersas do que no CPB14, fato este que influenciou a tensão interfacial e a performance do compósito no que diz respeito a tenacidade. Visto isso, temos no quadro 6.1 uma comparação entre as tensões interfaciais calculadas neste trabalho, para a polpa de bambu, e calculadas em outros trabalhos para outras fibras.

Quadro 6.1 – Resultados de tensão de adesão interfacial.

Autores	Tipo de fibra	Tipo de matriz	τ (MPa)
Neste trabalho	Polpa de bambu	Pasta de cimento	0,53 a 0,94
Andonian et al. (1979)	Pinus radiata	argamassa	0,35 a 0,45
Swamy e Mangat (1974)	aço	Concreto, pasta de cimento e argamassa	4,15
Akers e Garret (1983)	Asbesto	Pasta de cimento	Crisolita: 1,8 Crocidolita: 3,1

Conclui-se que a tensão de adesão interfacial da polpa de bambu é baixa em comparação com a do asbesto e a de aço. Este fato pode estar contribuindo para um menor valor da tenacidade quando o volume de fibras é incrementado. Desta forma fica comprovada a hipótese 4.

Para os compósitos ensaiados em estado saturado foi observada uma tendência a apresentar uma tenacidade inferior aos não saturados. Assim como um comportamento mais homogêneo para os dois lados ensaiados, CPBST e CPBSC.

Na literatura disponível não se encontram resultados de ensaios de impacto Charpy para compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais. Encontrou-se um trabalho no qual um compósito cimentício com sílica, reforçado por 8% de fibra celulósica (não é informado qual a fibra), foi ensaiado através de impacto Izod (MacVicar, 1997). O resultado obtido para um corpo-de-prova entalhado com geometria de 63,5 mm x 9,525 mm x 12,7 mm (comprimento x largura x espessura) foi de 1,35 kJ/m². Gopalaratnam e Shah (1986) encontraram valores de 0,102 kJ/m² para argamassa de cimento no ensaio de impacto Charpy e 0,075 kJ/m² para o ensaio estático. Já para concreto reforçado com fibras de aço a tenacidade sob impacto Charpy foi de 3,013 kJ/m² e de 1,71 kJ/m² para o ensaio estático (corpo-de-prova: 76,14mm x 25,38mm x 203mm). Suaris e Shah (1983) encontraram para argamassa de cimento no ensaio estático 0,075kJ/m² e no ensaio de impacto 0,102 kJ/m². Já para o concreto reforçado com fibras de aço, no ensaio estático a tenacidade obtida foi de 2,773 kJ/m² e no ensaio de impacto foi de 5,158 kJ/m² (corpo-de-prova: 38,1 mm x 76,2 mm x 457,2 mm).

Podem-se notar dois fatos importantes nestes resultados, o primeiro é o aumento da tenacidade quando comparamos o ensaio estático com o ensaio de impacto e o segundo é a influência da geometria no ensaio de impacto. Para o mesmo material (concreto reforçado por fibra de aço), porém com geometrias diferentes, o valor da tenacidade encontrado no trabalho de Gopalaratnam e Shah (1986) foi diferente do achado por Suaris e Shah (1983). Bader e Ellis (1974) relatam em seu trabalho que a tenacidade obtida através de ensaio de impacto Charpy do plástico reforçado com carbono variava de acordo com a geometria do corpo-de-prova. Portanto, uma análise preliminar nos mostra que não se pode comparar corpos-de-prova de geometria diferente no ensaio de impacto Charpy.

As figuras 6.14 e 6.15 mostram o comportamento das relações força x tempo para os diferentes corpos-de-prova no ensaio de impacto. Em algumas curvas, como a da figura 6.14, houve a formação um segundo e terceiro picos no gráfico. Este comportamento foi observado não só na concentração de 8% de bambu como também na de 14%. Este fato pode ser atribuído à ocorrência de

aglomerações de fibras de bambu ou a oscilações produzidas pelo próprio equipamento.

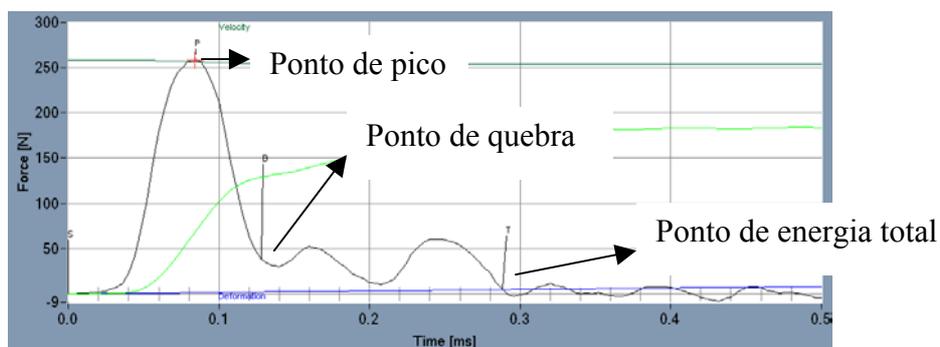


Figura 6.14 - Gráfico força x tempo do ensaio de impacto Charpy para o CPB14.

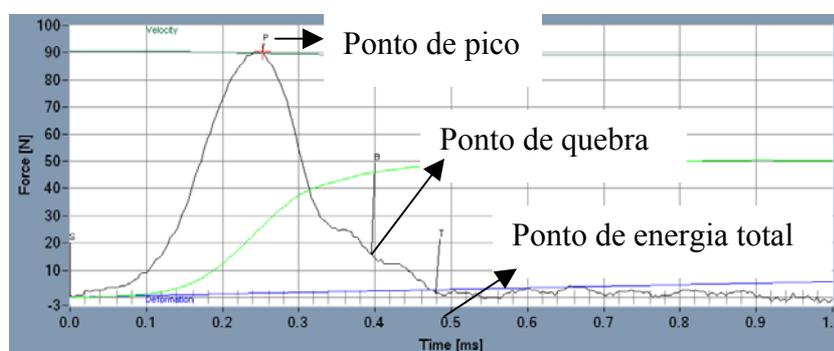


Figura 6.15 – Gráfico força x tempo do ensaio de impacto Charpy para CPB8.

Na tabela 6.3 são apresentados os resultados do ensaio de impacto Charpy para o CPBA.

Tabela 6.3 – Resultados de teste de impacto Charpy para CPBA.

Corpos-de-prova	Força Máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)	Porcentagem do modo de falha (%)
CPBA8T1	0,45±0,11	0,84±0,78	0,24±0,1	1,11±0,5	72
CPBA8T2	-	-	-	> 29	28
CPBA8C1	0,46±0,15	0,47±0,37	0,81±0,9	3,6±5,4	50
CPBA8C2	-	-	-	> 29	50
CPBA14T1	0,34±0,1	0,50±0,4	1±1,34	4,79±5,97	32
CPBA14T2	-	-	-	> 29	68
CPBA14C1	0,31±0,1	0,57±0,4	0,18±0,06	0,84±0,24	79
CPBA14C2	-	-	-	> 29	21

Dois modos de falha foram observados para os compósitos CPBA durante o ensaio de impacto Charpy. Alguns dos corpos-de-prova (CPBA2) apresentaram uma adesão forte entre a chapa de alumínio e o compósito enquanto outros apresentaram uma adesão fraca (CPBA1). Os comportamentos dos dois corpos-de-prova podem ser observados na figura 6.16. Esta diferença de comportamento refletiu em diferentes níveis de tenacidade. Os compósitos que apresentaram uma fraca adesão tiveram um baixo resultado de tenacidade enquanto os que tiveram uma boa adesão apresentaram um alto valor de tenacidade, o qual, de fato, não pode ser medido pelo equipamento utilizado. A tenacidade destes compósitos, que não pode ser determinada, pode ser apenas avaliada como sendo superior a 29 kJ/m^2 . Este valor é 6344% maior do que o da matriz sem reforço.



(a) CPBA1



(b) CPBA2

Figura 6.16 – Comportamento dos compósitos CPBA. (a) fraca adesão e (b) adesão forte.

6.1.1.2.

Flexão em 3 pontos

Na tabela 6.4 encontram-se os resultados para ensaios de flexão em três pontos realizados após 3 meses de exposição ao ar. No anexo B, podem ser vistos os gráficos carga x deflexão e tensão x deflexão para os compósitos. Nota-se para os compósitos CPB um grande aumento na tenacidade de $0,015 \text{ kJ/m}^2$ para $0,33 \text{ kJ/m}^2$ (CPB14T) assim como para o CPBA, o qual foi de $0,015 \text{ kJ/m}^2$ para $0,98 \text{ kJ/m}^2$. Assim como em outros trabalhos encontrados na literatura, o valor da tenacidade obtido através do ensaio de impacto é maior do que o obtido através do ensaio estático. Para o CPB14 nota-se uma tendência a um valor de tenacidade maior do que para o CPB8. Esta pequena melhora pode ser notada no ensaio de

flexão pela menor taxa de deformação ($0,126 \text{ s}^{-1}$), embora da mesma forma que foi demonstrado anteriormente o processo de produção resultou em uma aglomeração de fibras. Esta aglomeração prejudicou o comportamento do compósito no que diz respeito a tenacidade. O comprimento da polpa assim como a baixa adesão interfacial também interferiram na tenacidade como já demonstrado antes. Para o CPBA, a tenacidade obtida foi razoavelmente maior para o CPBA8 quando comparado com o CPBA14. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de alguns corpos-de-prova desenvolverem adesão alumínio-compósito cimentício maior do que de outros.

De acordo com Coutts (1994), para o ensaio estático, a tenacidade para pasta de cimento reforçada com 8 % de polpa de bambu é de $0,32 \text{ kJ/m}^2$ e com 14% de polpa é de $0,7 \text{ kJ/m}^2$. Coutts e Ni (1995) também acharam valores semelhantes (ensaio estático) para pasta de cimento reforçada com 8% de polpa ($0,29 \text{ kJ/m}^2$) e para 14% ($0,5 \text{ kJ/m}^2$) (neste último caso a cura foi feita em autoclave). Rodrigues (2003) obteve para pasta de cimento reforçada por 8% de polpa valor de tenacidade de $0,37 \text{ kJ/m}^2$. Já Dos Anjos obteve para pasta de cimento reforçada com 8% de polpa de bambu tenacidade de $0,56 \text{ kJ/m}^2$ e para 14%, $1,64 \text{ kJ/m}^2$. Os valores para o CPB8 ($0,28 \text{ kJ/m}^2$) calculados neste trabalho estão de acordo com o encontrado na pesquisa de Coutts (1994) e Coutts e Ni (1995) e Rodrigues (2003) enquanto os do CPB14 ($0,33 \text{ kJ/m}^2$) estão um pouco abaixo.

Tabela 6.4 - Resultados de teste de flexão em 3 pontos para CP0, CPB e CPBA.

(Ensaio realizado após 3 meses de exposição ao ar).

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m^2)
CP0	$0,06 \pm 0,01$	$0,13 \pm 0,02$	$5,07 \pm 2,0$	$11,66 \pm 2,3$	$0,004 \pm 0,001$	$0,015 \pm 0,006$
CPB8T	$0,11 \pm 0,02$	$0,58 \pm 0,25$	$9,21 \pm 2,2$	$5,62 \pm 1,3$	$0,08 \pm 0,04$	$0,28 \pm 0,16$
CPB8C	$0,09 \pm 0,01$	$0,4 \pm 0,1$	$7,17 \pm 0,69$	$5,4 \pm 1,2$	$0,04 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,04$
CPB14T	$0,07 \pm 0,03$	$0,9 \pm 0,38$	$4,8 \pm 1,98$	$2,0 \pm 0,8$	$0,09 \pm 0,06$	$0,33 \pm 0,21$
CPB14C	$0,06 \pm 0,02$	$0,77 \pm 0,09$	$4,2 \pm 1,06$	$4,37 \pm 1,27$	$0,08 \pm 0,03$	$0,27 \pm 0,09$
CPBA8	$0,58 \pm 0,2$	$1,51 \pm 0,85$	$27,44 \pm 10,0$	$7,31 \pm 3,65$	$0,33 \pm 0,24$	$0,98 \pm 0,72$
CPBA14	$0,42 \pm 0,12$	$1,72 \pm 0,36$	$18,27 \pm 5,6$	$5,77 \pm 2,34$	$0,23 \pm 0,07$	$0,69 \pm 0,22$

Embora não seja o escopo deste trabalho, o módulo de ruptura foi calculado para demonstrar a resistência à flexão dos compósitos. Para compósitos CPB8 notou-se um incremento de 82,8% em comparação com a matriz sem reforço. Entretanto para compósitos CPB14 foi observada uma resistência inferior ao da matriz sem reforço. Este fato pode ser explicado pela má dispersão das fibras no processo de fabricação o qual resultou em formação de grumos. Coutts (1994) obtiveram para o CPB8 módulo de ruptura de 14,9 MPa e para o CPB14, 18,2 MPa. Estes resultados são superiores aos encontrados neste trabalho e demonstram uma tendência ao aumento do módulo de ruptura para frações de massa de 14%. Este fato pode ser explicado por um processo de fabricação melhor estabelecido por Coutts (1994), pelo uso de um cimento de melhor qualidade e pelo uso de uma polpa de bambu com maior resistência à tração e de comprimento diferente. Visto que cada espécie de bambu apresenta uma resistência à tração específica, diferentes comprimentos podem ser obtidos no processo de polpação. Em comparação aos resultados obtidos por Dos Anjos (2002) também foi encontrado um menor valor do módulo de ruptura. Dos Anjos (2002) obteve para o compósito reforçado com 8% de polpa refinada 14,5 MPa, para o de 14% de polpa refinada 8,3 MPa e para a matriz sem reforço, 7 MPa (incremento de 107 %). Já para os compósitos reforçados por polpa não refinada Dos Anjos (2002) obteve para o CPB8 9,9 MPa e para o CPB14 6,2 MPa. No trabalho de Brescain (2003) foi encontrado para o CPB8 (com polpa refinada) resistência à flexão de 13,9 MPa e para o CPB14 de 9,47 MPa. Rodrigues (2003) obteve valor do módulo de ruptura de 15,53 MPa para compósito cimentício reforçado por 8% de polpa de bambu, entretanto a matriz sem reforço apresentou resistência de 12,93 MPa. Representando assim um incremento de apenas 20 % da matriz com reforço em relação aquela sem reforço.

Para os compósitos sanduíche, CPBA, o módulo de ruptura foi muito superior ao do compósito simples, alcançando valor de 27,44 MPa para o CPBA8. Este tipo de material seria ideal para uso em coberturas pela sua capacidade de absorção de energia assim como pelo seu elevado módulo de ruptura. Fora essas características mecânicas os compósitos sanduíche com placas de alumínio teriam uma maior durabilidade, pois protegeriam as fibras vegetais contra a ação do tempo.

Para o módulo de elasticidade à flexão foi visto que ocorreu um decréscimo em relação a matriz sem reforço e à medida que se aumentou a fração de massa de fibras. Este comportamento está de acordo com o encontrado por Coutts (1994) que o justificou afirmando que as fibras vegetais possuem módulo de elasticidade inferior ao do cimento e a regra das misturas poderia explicar esta redução do módulo. Porém, encontra-se na literatura valores para o módulo de elasticidade da fibra de bambu da ordem de 28 GPa (Guimarães, 1987), que é superior ao do cimento. Esta redução do módulo de elasticidade com o incremento de fibras pode estar relacionado a um aumento da porosidade do cimento provocado pelas fibras e pelo aumento no tempo de pega também provocado pela adição de fibras vegetais.

Como para este trabalho encontrou-se valores para a resistência à flexão, assim como para tenacidade, abaixo da obtida no trabalho de Dos Anjos (2002) e Brescain (2003), os quais foram feitos também na PUC-Rio, resolveu-se fazer mais duas séries de ensaios com o mesmo número de corpos-de-prova estabelecido anteriormente. Este teste, porém, foi executado com nova remessa de polpa e o tempo de exposição ao ar foi reduzido para 1 mês.

Os resultados para estes novos testes são encontrados na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Resultado de teste de flexão em 3 pontos para CPB. (Ensaio realizado após 1 mês de exposição ao ar).

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CPB8T (1 ^a s.)	0,074±0,02	0,98±0,37	6,33±1,5	5,0±1,61	0,1±0,03	0,38±0,12
CPB8C (1 ^a s.)	0,068±0,01	0,98±0,25	6,26±0,7	5,11±0,8	0,09±0,02	0,41±0,11
CPB14T (1 ^a s.)	0,061±0,02	1,77±0,36	4,64±1,6	1,26±0,67	0,23±0,08	0,53±0,11
CPB14C (1 ^a s.)	0,045±0,01	1,77±0,38	3,3±0,78	1,05±0,47	0,14±0,03	0,52±0,11
CPB8T (2 ^a s.)	0,1±0,02	0,46±0,1	10±1,22	5,97±1,32	0,055±0,02	0,22±0,08
CPB8C (2 ^a s.)	0,095±0,04	0,4±0,2	8±1,6	6,58±1,14	0,045±0,01	0,18±0,04
CPB14T (2 ^a s.)	0,06±0,02	1,58±0,6	5±1,3	0,94±0,38	0,1±0,03	0,4±0,11
CPB14C (2 ^a s.)	0,047±0,02	1,38±0,6	3,3±1	0,9±0,5	0,1±0,02	0,38±0,08

Onde: 1^a s. e 2^a s. = 1^a e 2^a série, respectivamente.

Notou-se que tanto para a primeira quanto para a segunda série dos ensaios realizados com 1 mês de exposição ao ar, os resultados para o módulo de ruptura foram próximos daqueles encontrados aos 3 meses de exposição ao ar. Porém no que diz respeito à tenacidade, os valores encontrados nestas duas novas baterias de teste foram superiores aos encontrados anteriormente. Notou-se também que a diferença entre os compósitos CPB8 e CPB14 foi superior ao encontrado anteriormente e o resultado encontrado para o CPB14 foi bem semelhante ao encontrado por Coutts (1994). Conclui-se que o método de fabricação é uma variável de grande importância. A dispersão das fibras é fator primordial na manufatura destes materiais, afetando de maneira vital o comportamento dos compósitos tanto na tenacidade quanto no módulo de ruptura e módulo de elasticidade. Para futuras pesquisas utilizando esta metodologia de fabricação, é necessário um aperfeiçoamento do método para que não haja o acréscimo de mais uma variável, que é o processo de fabricação.

Para verificar a validade dos resultados de tenacidade obtidos, além da comparação com trabalhos da literatura disponível, foi utilizada teoria proposta por Marston et al.(1974). Nesta teoria a tenacidade do compósito (R) é dada pela soma da tenacidade obtida do arrancamento das fibras (R_{po}), redistribuição das tensões (R_{Re}) e devido a criação de novas superfícies resultante de fraturas (R_s). Porém, de acordo com Mai (1979) se o comprimento da fibra for menor que o seu comprimento crítico, R_{re} pode ser desprezado, então:

$$R = R_{po} + R_s \quad (6.19)$$

Os termos R_{po} e R_s dados por Mai (1979) são:

$$R_{po} = \frac{\eta v_f L^2 \tau}{6d} \quad (6.20)$$

e

$$R_s = v_m R_m + (\eta v_f) \frac{\bar{L} R_{if}}{d} \quad (6.21)$$

onde,

v_m = fração volumétrica da matriz.

R_m = tenacidade da matriz.

η = fator de eficiência.

v_f = fração volumétrica das fibras.

D = diâmetro das fibras.

\bar{L} = comprimento médio de arrancamento.

R_{if} = tenacidade da interface fibra-matriz.

Em alguns trabalhos como no de Mai (1979), Marston et al. (1974) e Sanadi et al. (1986) encontra-se uma aproximação, na qual R_{if} é igualado a R_m . Porém a forma correta de se calcular R_{if} é dada a seguir:

$$R_{if} = \frac{\sigma_f^2 d}{8E_f} \quad (6.22)$$

onde,

E_f = módulo de elasticidade da fibra.

σ_f = resistência à tração da fibra.

Entretanto para a utilização da equação 6.22 é necessário ter os valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração da fibra. Valores estes os quais nem sempre são fáceis de se obter experimentalmente.

Obtém-se, para o caso simplificado $R_{if} = R_m$, como proposto por Mai (1979), estabelecendo $L = L/4$ (comprimento médio de arrancamento para o asbesto), a equação geral para o cálculo da tenacidade como:

$$R = \frac{\eta v_f L^2 \tau}{6d} + \left[v_m + \eta \frac{v_f L}{d} \right] R_m \quad (6.23)$$

Entretanto, se for utilizado o valor de R_{if} , conforme equação 6.22 e comprimento médio calculado por Krenchel (1964) de acordo com a equação 6.2:

$$\bar{L} = \frac{\sigma_f}{4\tau} d \quad (6.24)$$

obtém-se uma nova equação para o cálculo da tenacidade:

$$R = \frac{\eta v_f L^2 \tau}{6d} + v_m R_m + (\eta v_f) \frac{\sigma_f^3 d}{32E_f \tau} \quad (6.25)$$

Neste trabalho foram calculadas as tenacidades de forma teórica de acordo com as duas equações propostas - 6.23 e 6.25. Para esse cálculo foram utilizados fator de eficiência de 0,41 proposto por Romualdi e Mandel (1964), valores de resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra encontrados na literatura e valor de adesão interfacial fibra-matriz de 0,53 MPa. Este valor de adesão interfacial foi escolhido por se tratar do menor valor achado para o compósito CPB8 o qual apresentou uma homogeneidade um pouco melhor do que o CPB14. Na literatura encontra-se valor para o comprimento da polpa de bambu de 2,8 mm e 1,6 mm. Foi considerado então o valor de 1,6 mm por se achar mais próximo aos valores medidos, aproximadamente, através do MEV. Na tabela 6.6 encontram-se os valores teóricos obtidos pelo uso das equações 6.23 e 6.25 assim como os valores experimentais. Para os valores experimentais foram considerados os valores máximos encontrados nos experimentos.

Tabela – 6.6 – Resultados para a tenacidade (R) experimentais e analíticas do CPB (kJ/m²)

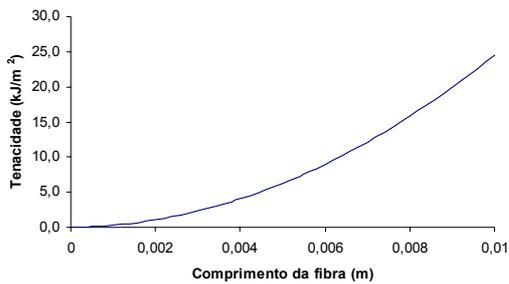
Corpos-de-prova	Experimental		Analítico	
	Flexão	Impacto	Eq. 6.23	Eq. 6.25
CPB8	0,41	0,65	0,49	0,77
CPB14	0,53	0,66	0,70	1,09

Nota-se que os valores encontrados através da equação 6.23 estão abaixo dos encontrados pela equação 6.25. Este fato pode ser explicado pela aproximação de $R_{if} = R_m$, sendo o valor encontrado experimentalmente para R_m relativamente baixo (15 J/m²). Entretanto os valores encontrados a partir da equação 6.23 foram mais próximos aos valores experimentais. Os valores encontrados analiticamente se encontram na faixa de valores encontrados experimentalmente, fato este que demonstra um correto procedimento experimental. É verdade que os valores obtidos experimentalmente não são exatamente os mesmos dos obtidos analiticamente, porém existe uma série de variáveis experimentais que afetam estes resultados. Estas podem ser enumeradas abaixo como:

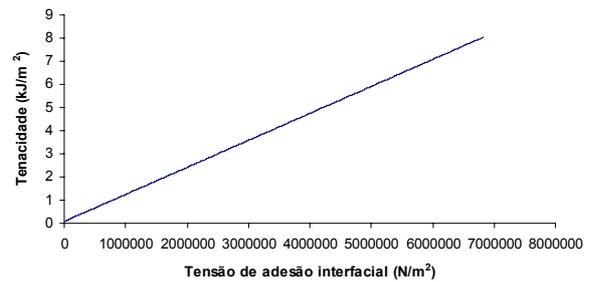
- 1 – Processo de fabricação - acarretou formação de grumos.
- 2 – Determinação do comprimento e diâmetro de fibras – aproximação na determinação da geometria das fibras.

- 3 – Cálculo da tensão interfacial – grande variação de valores.
- 4 – Vários métodos para se determinar o fator de eficiência.
- 5 – Variabilidade dos valores do módulo de elasticidade e resistência à tração das fibras.

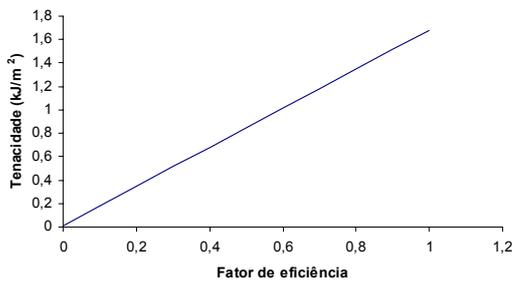
A partir dos gráficos da figura 6.17 pode se ter uma idéia de como o comprimento, o diâmetro, o fator de eficiência, a tensão interfacial e a fração volumétrica afetam a equação 6.23:



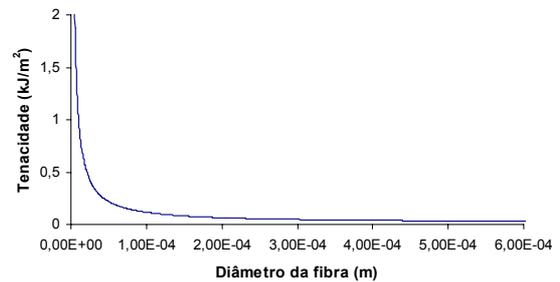
(a)



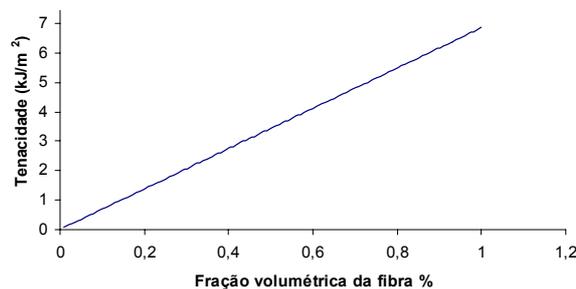
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6.17 – Influência do (a) comprimento, (b) tensão de adesão interfacial, (c) fator de eficiência, (d) diâmetro e (e) fração volumétrica da fibra na tenacidade.

Nota-se que tanto para a tensão de adesão interfacial como para o fator de eficiência e fração volumétrica de fibras há uma variação linear da tenacidade em relação a esses fatores. Entretanto, para o comprimento existe uma variação exponencial, pois este na equação 6.23 é elevado ao quadrado. Já em relação ao diâmetro vê-se que quanto menor for o seu valor maior será a tenacidade.

6.1.2. Propriedades físicas

Os índices físicos: densidade, porosidade aparente e absorção de água foram calculados e seus resultados se encontram na tabela 6.8.

Tabela 6.7 – Índices físicos para CP0, CPB e CPBA.

Corpos-de-prova	Densidade (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
CP0	1690±140	31,8±2,97	18,98±2,87
CPB8	1410±40	31,35±2,39	22,29±2,18
CPB14	1160±40	39,95±2,43	34,4±2,68
CPBA8	1690±70	24,11±5,56	14,47±4,52
CPBA14	1520±70	27,23±6,3	18,11±4,72

Com o incremento na fração em massa de fibras, notou-se diminuição na densidade do compósito, fato considerado positivo para o uso deste material em aplicações no ramo da construção civil uma vez que este é mais leve do que o compósito sem reforço. A porosidade aparente aumenta com o aumento das proporções de fibras. Este aumento na porosidade pode ser um outro fator que afeta a tenacidade e o módulo de ruptura nos compósitos CPB14T. A absorção de água também é incrementada quando se compara o CPB0, o CPB8 e o CPB14, fato este explicado pela grande capacidade das fibras vegetais em absorver água.

6.1.3. Análise microestrutural

As fibras vegetais são muito sensíveis a mudanças devido à umidade. Fato este que afeta tanto suas propriedades mecânicas quanto suas dimensões. Quando saturada, a fibra vegetal ganha ductilidade e perde rigidez (Bentur et al., 1990). De acordo com Fordos et al. (1986) se acredita que o mecanismo de fratura depende do tipo de fibra, resistência da fibra e da umidade da amostra. Normalmente as amostras úmidas apresentam uma menor adesão fibra-matriz se caracterizando pela ocorrência de mais arrancamento de fibras (Fordos et al., 1986). Já quando a umidade é baixa a fratura das fibras é o mecanismo principal de falha (Fordos et al., 1986). Coutts e Kightly (1982 e 1984) e Mai et al. (1983) também chegaram à conclusão de que os mecanismos principais de fratura de um compósito cimentício reforçado com fibras vegetais em um ensaio de flexão são a fratura e o arrancamento das fibras, sendo que o primeiro é predominante em compósitos secos em estufa e o segundo em compósitos saturados. Porém, Mai et al. (1983) relatam que não é claro como a água afeta a adesão na interface fibra-matriz. A microestrutura da matriz na região das fibras depende da tecnologia de produção e cura, e também pode variar com a porosidade. Uma microestrutura mais aberta (com maior porosidade) pode levar a uma falha por arrancamento da fibra enquanto uma mais densa pode levar a fratura da fibra (Bentur et al., 1990).

Neste trabalho estudou-se a microestrutura de compósitos reforçados com 8% e 14% em relação à massa de cimento após a fratura em ensaios de impacto e de flexão em 3 pontos. Observou-se que os modos de falha presentes nos dois tipos de ensaios foram de arrancamento e de fratura da fibra. O modo de falha predominante em todas as análises, como será detalhadamente explicado a seguir, foi o de arrancamento. Estas análises foram todas feitas tendo o compósito sido ensaiado após secagem em estufa.

Através da figura 6.18 é analisada uma amostra de CPB8 fraturada após ser ensaiada ao impacto. Nota-se que pelos diversos sulcos deixados na matriz que o modo principal de falha foi o de arrancamento das fibras.

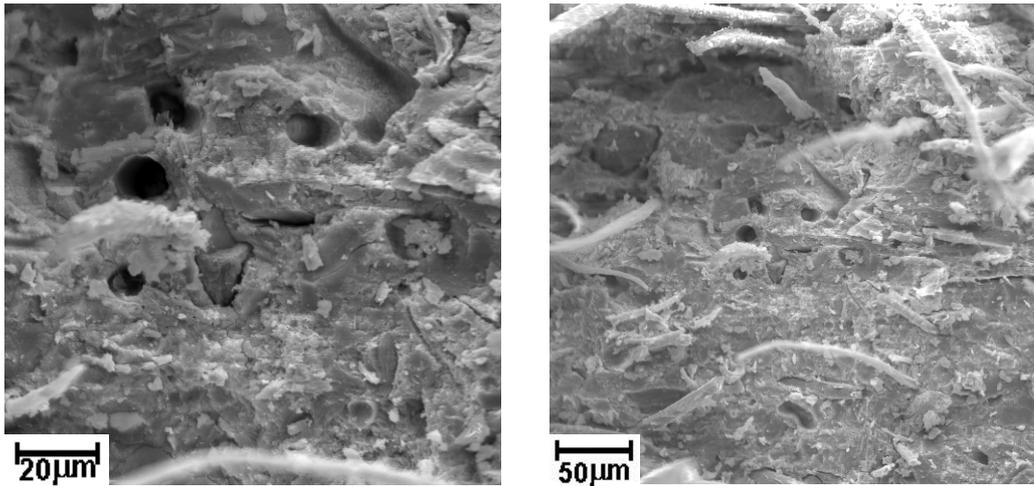
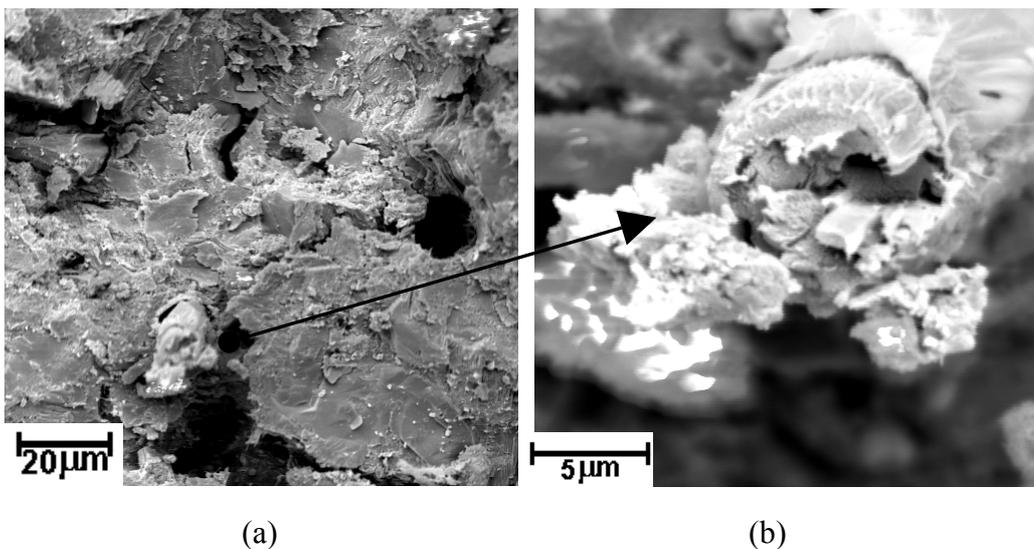


Figura 6.18 – Compósito CPB8 fraturado após ensaio de impacto.

Na figura 6.19 é ilustrada uma fibra fraturada (uma ampliação da mesma pode ser vista na figura 6.19-b) e vários sulcos indicando que o modo principal de falha foi o de arrancamento das fibras. Esta análise ainda é para o CPB8 após ensaio de impacto.



(a)

(b)

Figura 6.19 – Compósito fraturado no qual pode ser visto uma fibra fraturada (a) e sua ampliação (b)

Na figura 6.20, que retrata compósito com 14% de concentração de polpa de bambu após ensaio de impacto, também nota-se uma maior quantidade de fibras arrancadas em relação às fibras fraturadas, porém vê-se uma maior quantidade de fibras fraturadas do que na matriz com 8% de fibras. Como a aderência fibra-matriz é insuficiente não pode-se dizer que a maior quantidade de fibras arrancadas contribuiu para uma maior tenacidade do compósito. O tamanho das fibras de bambu, entre 1 e 3 mm, pode não estar garantindo um comprimento

de ancoragem suficiente para uma total transferência de tensão entre a matriz e as fibras, fato este que contribuiu para uma maior quantidade de fibras arrancadas e que poderia explicar uma mesma resistência para os compósitos com 8 % e 14 % de reforço.

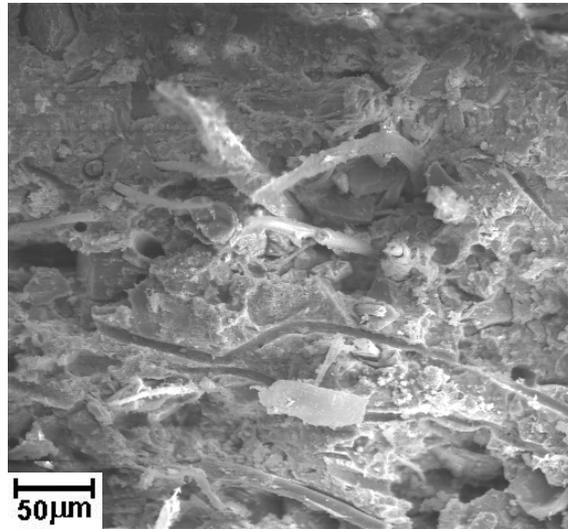


Figura 6.20 – Compósito CPB14 fraturado por ensaio de impacto.

Para ensaios de flexão em 3 pontos, os modos de fratura apresentados são os mesmos do que os observados nos ensaios de impacto como se pode comprovar pela figura 6.21. Porém vê-se maior quantidade de fibras fraturadas do que as observadas nos ensaios de impacto, embora a predominância ainda seja a de fibras arrancadas.

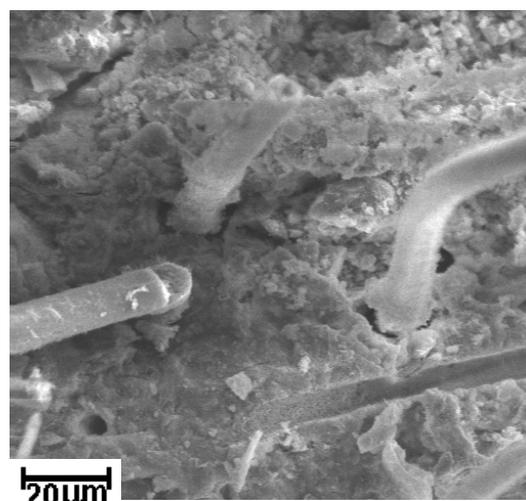
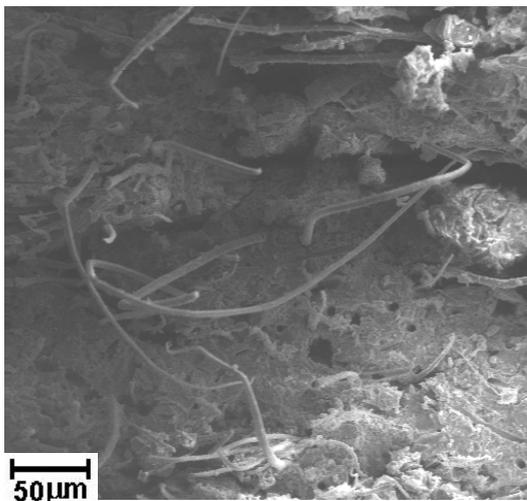


Figura 6.21 – Compósito CPB8 fraturado por ensaio de flexão em 3 pontos.

Comparando a figura 6.22 com as figuras 6.18 a 6.21 pode-se ver a diferença na superfície de fratura de uma matriz sem reforço para uma matriz com reforço. Na matriz sem reforço a superfície é bem mais plana do que na matriz com reforço, ficando claro os poros existentes no cimento.

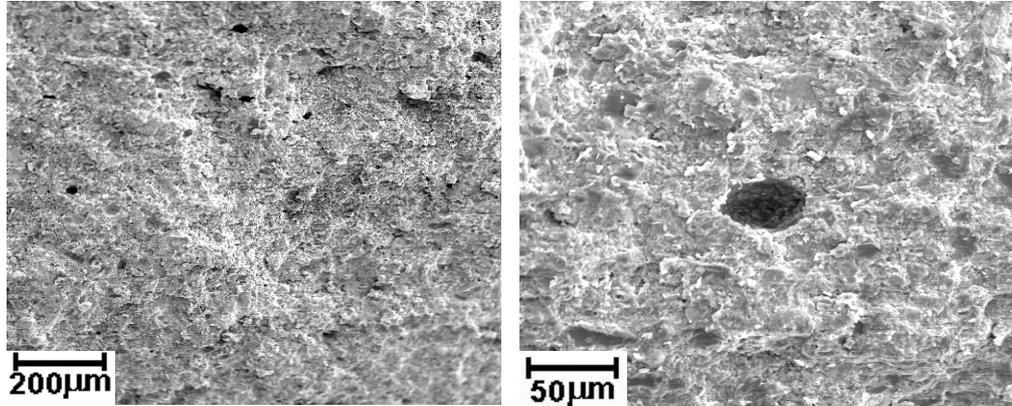


Figura 6.22 - Superfície de fratura plana de um corpo de prova sem reforço.

Fica claro através da figura 6.23 que o processo de fabricação acarretou a formação de grumos, os quais, como anteriormente explicado, interferiram de forma prejudicial na tenacidade e no módulo de ruptura.

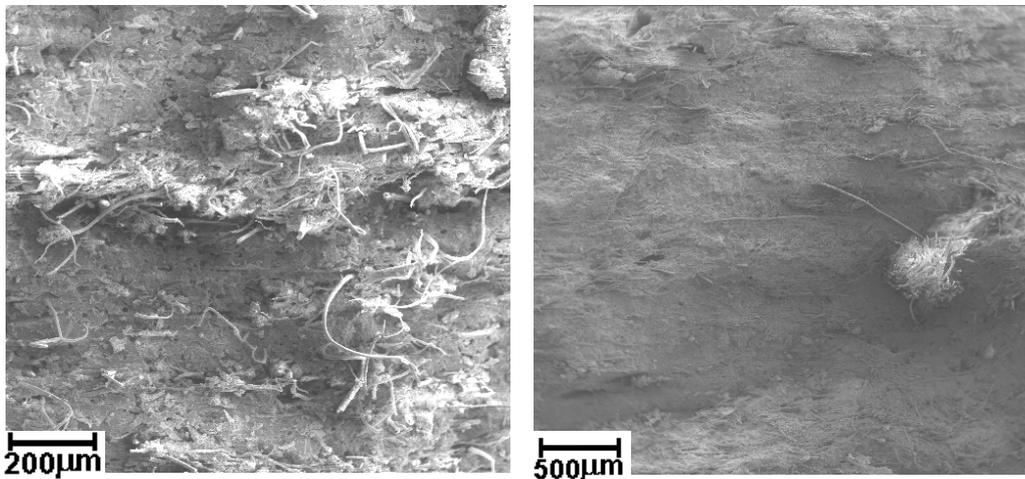


Figura 6.23 – Aglomerações de fibras em compósitos CPB8.

Conclui-se que para compósitos cimentícios ensaiados ao impacto (secos em estufa) o principal modo de falha é o de arrancamento encontrando-se ainda poucas fibras fraturadas. Para o ensaio de flexão encontram-se os modos de falha: arrancamento e fratura de fibras, com o arrancamento sendo predominante porém com maior ocorrência de fraturas do que constatado no ensaio de impacto.

6.1.4. Propriedades térmicas

6.1.4.1. Condutividade térmica

Apenas para o CPB8 foi feito o teste de condutividade térmica através da técnica da placa protegida (“Guarded Hot Plate”). O valor encontrado através deste teste, no qual apenas uma amostra foi ensaiada, foi de $0,0247 \text{ W/m.K} \pm 0,0041$ com temperatura de referência de $29,4 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,07$. Necessita-se de mais ensaios para se ter uma certeza do resultado obtido. Infelizmente por problemas operacionais o restante dos ensaios não foi realizado até o final desta pesquisa. Através da tabela 6.8 pode-se ter uma idéia do resultado obtido para o CPB8 quando comparado com outros materiais.

Tabela 6.8 – Valores de condutividade térmica para diferentes materiais.

Materiais	Condutividade térmica W/m.K	Referência
Madeira	0,079 a 0,17	Simpson et al. (1999)
Pasta de cimento reforçado com grama de elefante.	0,33	Aziz et al. (1984)
Pasta de cimento reforçado com asbesto.	0,36	Aziz et al. (1984)
Argamassa reforçada com fibra de coco, $v_f = 5\%$, espessura = 25.4 mm	0,68	Paramasivam et al. (1984)
Pasta de cimento	0,53	Xu e Chung (2000)
Argamassa reforçada com fibra de coco (1:1:30%) (cimento:areia:fibra)	0,1903	Khedari et al. (2001)

De acordo com Xu e Chung (2000) um menor valor da condutividade térmica é desejado para se obter um melhor isolamento térmico, porém se é

preciso diminuir o gradiente de temperatura e, conseqüentemente, as tensões térmicas em uma estrutura, é preferível uma maior condutividade térmica. Para o uso do material estudado nesta pesquisa, que pode, por exemplo, ser utilizado para fins de cobertura e vedação, é desejável uma baixa condutividade térmica. Comparando com os resultados da literatura, a condutividade térmica encontrada é muito pequena, abaixo até da madeira que é considerada um bom isolante térmico. Já que o resultado obtido foi de um único ensaio, mesmo que o material tenha mostrado bom desempenho, é preciso que se realize mais testes para ter certeza do resultado aqui obtido.

6.1.4.2. Análise termogravimétrica (TGA)

Foi realizado ensaio de termogravimetria na polpa de bambu com o intuito de estabelecer até que temperatura esta fibra poderia ser submetida sem a perda de suas propriedades mecânicas. Nas figuras 6.21a e 6.21b podem se observar as curvas de termogravimetria (TGA) e termogravimetria diferencial (DTGA), respectivamente.

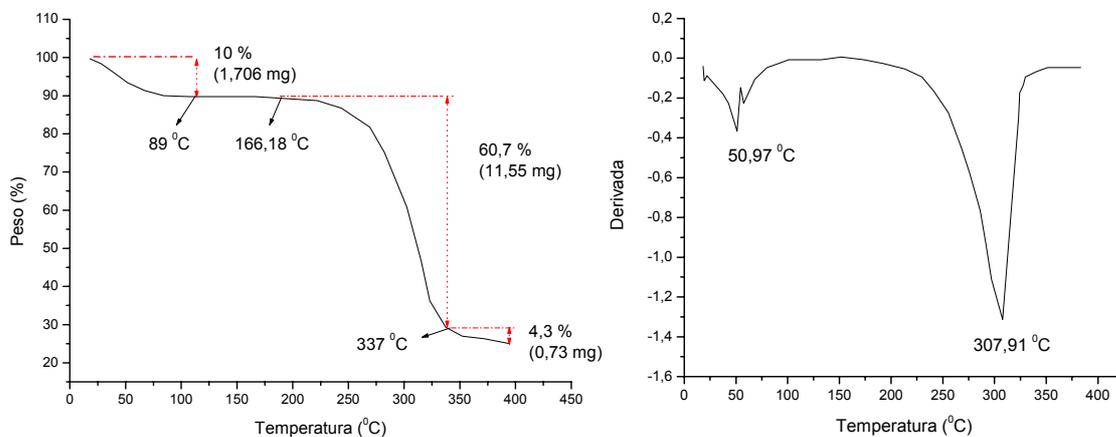


Figura 6.24 – (a) Termogravimetria e (b) termogravimetria diferencial da polpa de bambu.

Observa-se uma perda de água absorvida pela polpa referente a 10% do peso total da amostra até a temperatura de 89 °C. De acordo com Deka et al. (2003), trabalho no qual estudou-se a degradação térmica do bambu em sua forma natural, nota-se também uma pequena perda de massa até 100 °C devido à evaporação de

água das amostras. De acordo com Das et al.(1999), nota-se para a juta uma perda inicial de massa de 10,52% à temperatura de 64,7 °C relativo a perda de água.

A partir deste ponto, no qual foi notada a perda de água absorvida pela polpa de bambu, o comportamento desta é estável até a temperatura de 166,18 °C, onde começa a degradação térmica da polpa. Entre 166,18 °C até a temperatura de 337 °C há uma perda de 60,7 % do peso total da amostra. Nesta última temperatura nota-se uma perda acumulada de 70,7 %, restando então apenas 29,3 % do peso da amostra. À 400 °C resta apenas 25% da massa da amostra. No trabalho de Deka et al.(2003) para o bambu sem tratamento a perda principal de massa começa na temperatura de 163 °C. Já no trabalho de Das et al. (1999) há, para temperatura de 182,3 °C, uma perda da hemicelulose e na temperatura de 345,2 °C, perda da α -celulose, onde acontece a degradação máxima da fibra. De acordo com Hatakeyama et al. (1999) a decomposição térmica da celulose começa a 330 °C e o resíduo de massa a 400 °C é de apenas 15 %. Ainda de acordo com Hatakeyama et al.(1999) a lignina começa a degradar-se a 320 °C e o resíduo de massa a 500 °C é de 55%. Os resultados mostrados na figura 6.24 estão de acordo com os dados da bibliografia e o pico de 307,91 °C pode ser atribuído a degradação da celulose. Valores ligeiramente diferentes das temperaturas de degradação são esperados devido a variações de composição dos constituintes de diferentes espécies químicas.

6.2.

Compósito cimentício reforçado por polpa de sisal (CPS)

6.2.1.

Análise mecânica

Os resultados para os testes de impacto podem ser vistos na tabela 6.9. Para o CPS14T, compósito o qual apresentou melhor desempenho, é observado um incremento de 115 % em relação à matriz sem reforço. Apesar do alto desvio padrão para as amostras com fração em massa de 14 %, é notado uma tendência a um maior valor de tenacidade para os compósitos CPS14, de forma contrária ao que aconteceu com os compósitos CPB os quais apresentaram mesmo valor de tenacidade para as duas proporções de fibras estudadas.

Tabela 6.9 – Resultados de teste de impacto Charpy para CPS.

Corpos-de-prova	Força Máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,35±0,11	0,31±0,05	0,05±0,01	0,45 ± 0,09
CPS8T	0,26±0,09	0,49±0,51	0,09±0,02	0,75±0,19
CPS8C	0,30±0,14	0,36±0,32	0,08±0,02	0,68±0,18
CPS14T	0,19±0,087	0,68±0,73	0,13±0,08	0,97±0,66
CPS14C	0,21±0,085	0,69±0,31	0,12±0,11	0,90±0,82

Este fato poderia ser explicado pelas seguintes hipóteses:

1 – Maior resistência à tração da fibra de sisal: na literatura encontram-se valores da resistência à tração do sisal maiores do que o da polpa de bambu como pode ser observado através das tabelas 2.1 e 2.2. Tendo uma maior resistência à tração, a fibra de sisal é capaz de absorver maiores tensões do que as fibras de bambu. Fato este que pode ter levado, mesmo com uma dispersão falha, a uma maior tenacidade dos compósitos CPS.

2 – Melhor dispersão das fibras: através de observações no MEV (figura 6.25) nota-se a formação de grumos assim como aconteceu com as polpas de

bambu. Dessa forma esta hipótese não é verdadeira, a dispersão das fibras continua a ser de forma não desejável.

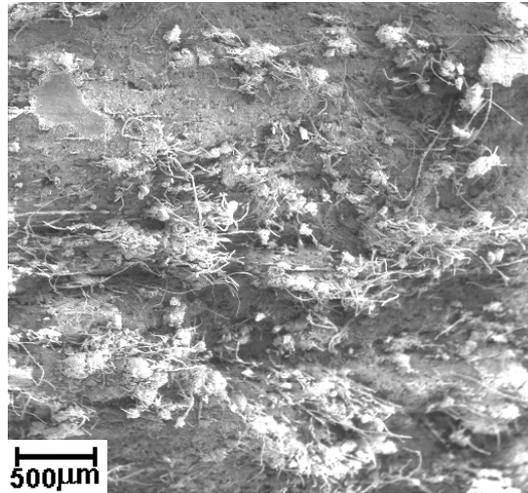


Figura 6.25 – Formação de grumos em compósito CPS8.

3 – Maior tensão de aderência interfacial e menor comprimento crítico: são apresentados pela tabela 6.10 os valores de tensão de aderência interfacial da polpa de sisal assim como o seu comprimento crítico.

Tabela 6.10 – Resultados de tensão de adesão interfacial e comprimento crítico do CPS.

Compósito	τ (MPa)	L_c (mm)
CPS8T	1,98	1,8
CPS8C	2,08	1,7
CPS14T	1,73	2,0
CPS14C	1,51	2,3

Nota-se que a tensão de adesão interfacial é superior àquelas obtidas pelos compósitos CPB e conseqüentemente seus comprimentos críticos são menores. Esta elevada tensão interfacial pode estar levando os compósitos CPS a uma melhor capacidade de absorver energia. Na literatura encontra-se para a polpa de sisal o comprimento de 1,65 mm (Savastano, 2000) enquanto que neste trabalho tentou-se medir a polpa de sisal como descrito no procedimento experimental e obteve-se o comprimento de 2,5 mm \pm 1,1 mm. Entretanto, com uma tendência

deste comprimento ser abaixo de 2,5 mm como pode ser concluído através do histograma mostrado na figura 6.26.

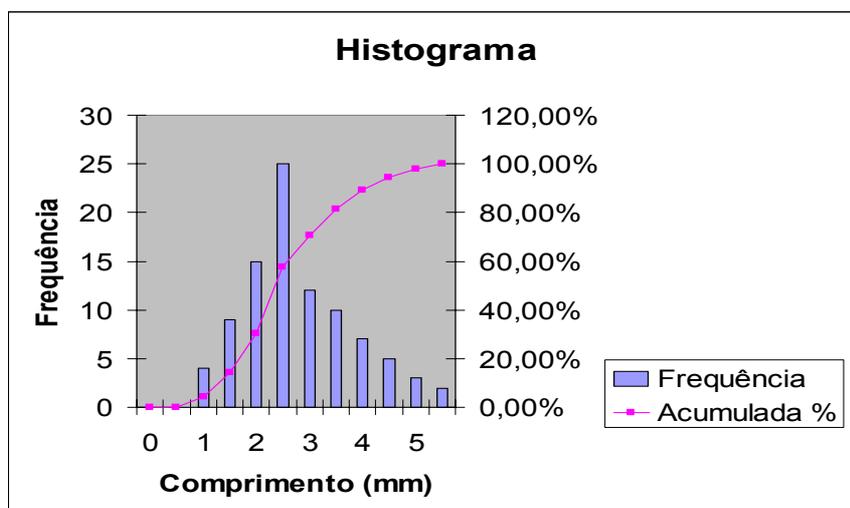


Figura 6.26 – Histograma do comprimento da fibra de sisal.

Os valores de comprimento crítico calculados, entre 1,7 mm e 2,3 mm se encontram bem próximos aos dos comprimentos da polpa de sisal. Fato este que também pode estar contribuindo para uma maior tenacidade dos compósitos CPS.

Os resultados da tenacidade obtidos através do ensaio de flexão em 3 pontos assim como o módulo de elasticidade e módulo de ruptura são apresentados na tabela 6.11.

Tabela 6.11 – Resultados de teste de flexão em 3 pontos para CPS.

Corpos de prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,06±0,01	0,13±0,02	5,07±2,0	11,66±2,3	0,004±0,001	0,015±0,006
CPS8T	0,16±0,04	1,9±0,3	12,81±2,57	5,04±2,59	0,53±0,06	1,94±0,21
CPS8C	0,16±0,03	1,0±0,33	12,72±2,43	5,86±2,46	0,30±0,08	1,13±0,31
CPS14T	0,2±0,03	1,65±0,29	14,26±1,9	3,7±1,46	0,52±0,07	1,70±0,27
CPS14C	0,19±0,05	1,5±0,35	13,15±3,3	4,33±1,34	0,55±0,09	1,89±0,31

É notado para o CPS um valor de tenacidade (1,94 kJ/m²) superior ao obtido pelo CPB provando assim uma maior resistência à tração do sisal. Não houve melhora para os compósitos CPS14 em relação aos CPS8, fato este que

também foi notado por Coutts e Warden (1992). Entretanto, para Savastano (2003) houve uma melhora substancial quando se aumentou a proporção de fibras. Coutts e Warden (1992) reportaram um valor de tenacidade de $2,49 \text{ kJ/m}^2$ para compósitos (matriz: argamassa) reforçados com polpa de sisal Kraft com 8% de fração de massa e 3,07 para 12%. Já Savastano et al. (2003) reportou um valor de aproximadamente $0,58 \text{ kJ/m}^2$ para pasta de cimento reforçada com 8% de fração em massa de sisal e $1,6 \text{ kJ/m}^2$ para 12%.

Neste trabalho encontrou-se uma melhora no módulo de ruptura para frações em massa de fibras superiores a 8% fato este que ocorreu de forma inversa no trabalho de Coutts e Warden (1992) e Savastano et al. (2003). Nestes dois trabalhos a fração em massa ótima foi a de 8%, valores estes correspondentes a 18,3 MPa para Coutts e Warden (1992) e 18-20 MPa para Savastano et al.(2003). Neste trabalho foi obtido para o CPS8, 12,81 MPa e para o CPS14, 14,26 MPa. A diferença entre os valores obtidos neste trabalho e os citados na bibliografia pode ser explicada pelo processo de dispersão das fibras, diferente resistência à tração das fibras, cimentos com propriedades mecânicas diferentes, diferentes processos de polpação e diferentes comprimentos de fibra.

Através das equações 6.23 e 6.25, a tenacidade teórica para os compósitos CPS foi calculada como pode ser apreciado na tabela 6.12. Novamente foi utilizado o fator de eficiência de 0,41 proposto por Romualdi e Mandel (1964). Utilizou-se para tensão de adesão interfacial o valor de 1,98 MPa seguindo a mesma metodologia do item anterior a qual é a de adotar o limite inferior, valores de comprimento de fibra de 1,6 mm (Savastano, 2000) e 2,5 mm (este trabalho) e diâmetro de 0,0135 mm (Savastano, 2000).

Tabela 6.12 - Resultados para a tenacidade (R) experimentais e analíticas do CPB (kJ/m^2)

Corpos-de-prova	Experimental		Analítico Tam. Fibra = 1,6 mm		Analítico Tam. Fibra =2,5 mm	
	Flexão	Impacto	Eq. 6.23	Eq. 6.25	Eq. 6.23	Eq. 6.25
CPS8	$1,94 \pm 0,21$	$0,75 \pm 0,19$	1,98	2,08	4,48	4,56
CPS14	$1,89 \pm 0,31$	$0,97 \pm 0,66$	2,82	2,97	6,39	6,5

Nota-se que para os compósitos CPS o valor da tenacidade obtido pelos dois modelos foi praticamente o mesmo e ficou próximo ao valor calculado através do ensaio de flexão, se for levado em conta o desvio padrão. O fato das duas equações utilizadas para o cálculo da tenacidade terem dado resultados praticamente iguais, de forma diferente do que se obteve para o CPB, pode ser explicado pelo uso de uma resistência à tração e módulo de elasticidade mais condizentes com a realidade da polpa utilizada. Estes valores, como explicado anteriormente foram retirados da literatura disponível sendo 800 MPa a resistência à tração e 20 GPa o módulo de elasticidade como pode ser visto na tabela 2.2. Os resultados para a tenacidade, obtidos a partir do ensaio de impacto, para o CPS estão abaixo dos encontrados a partir do ensaio de flexão e abaixo da equação teórica. Fato este contrário ao observado no CPB, onde o valor da tenacidade proveniente do ensaio de impacto foi superior aquele obtido pelo ensaio de flexão. Vê-se que o comprimento da fibra pode estar abaixo de 2,5 mm como mostra a tendência do histograma. Muito provavelmente o seu comprimento se encontra na faixa de 1,3 a 1,9 mm comprovada por análise através das equações 6.23 e 6.25.

Os índices físicos determinados para este compósito estão expostos na tabela 6.13. Pode-se notar que a densidade do CPS se encontra em faixa próxima a do compósito CPB caracterizando mais uma vez que os compósitos reforçados por fibras naturais, através do seu menor peso, apresentam vantagens para o seu uso na construção civil em aplicações já anteriormente explanadas. Já a porosidade aparente é relativamente menor que a encontrada para o CPB e a capacidade de absorção de água é praticamente igual.

Tabela 6.13– Índices físicos do CPS.

Corpos-de-prova	Densidade (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
CPS8	1260±50	27,99±2,22	22,21±2,36
CPS14	1110±80	34,72±2,92	31,72±3,64

6.2.2. Análise microestrutural

Assim como observado nos compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu, os reforçados por polpa de sisal também apresentam como modo predominante de fratura o arrancamento das fibras. Pode-se observar através da figura 6.27 cavidades as quais comprovam que fibras foram arrancadas após ensaio de impacto.

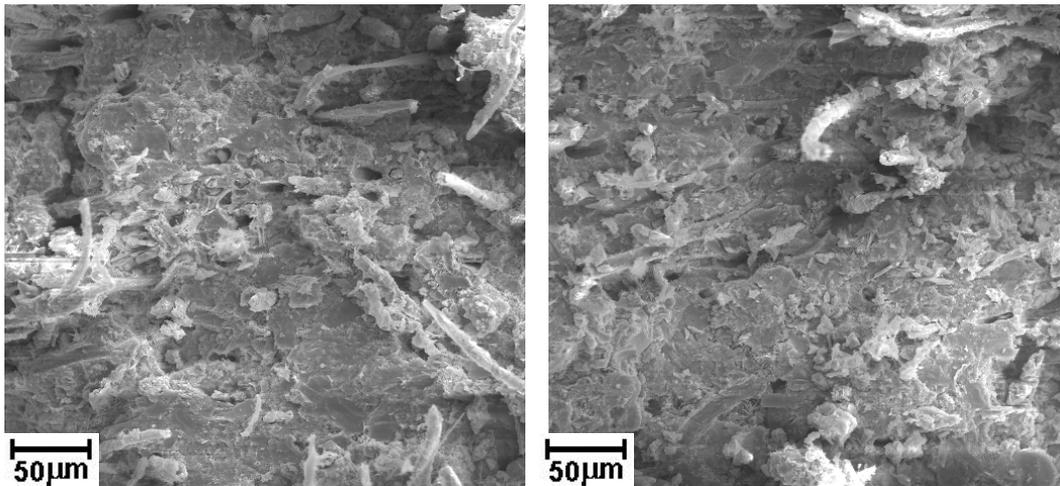


Figura 6.27 – Compósitos CPS8 fraturados por ensaio de impacto.

Apesar do sisal apresentar uma tensão de adesão interfacial superior ao do bambu, esta não contribuiu para um modo predominante de fratura das fibras. Fato este que acarretaria a um menor valor de tenacidade para os compósitos CPS. Mais uma vez observou-se uma formação de aglomerados de fibras resultante do processo de fabricação como pode ser comprovado pela figura 6.28.

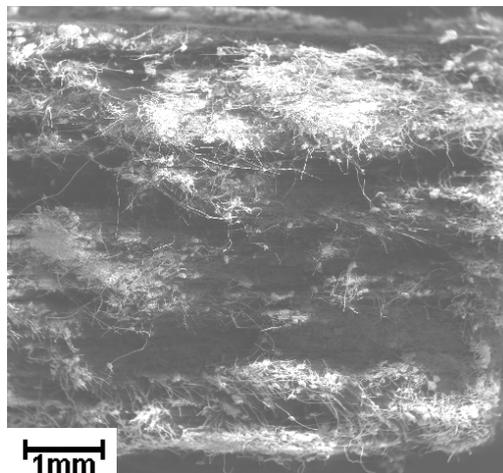


Figura 6.28 - Aglomeração de fibras em compósito CPS14.

6.2.3. Propriedades térmicas

6.2.3.1. Análise termogravimétrica (TGA)

Através das figuras 6.29a e 6.29b tem-se os gráficos de termogravimetria e termogravimetria diferencial para a polpa de sisal.

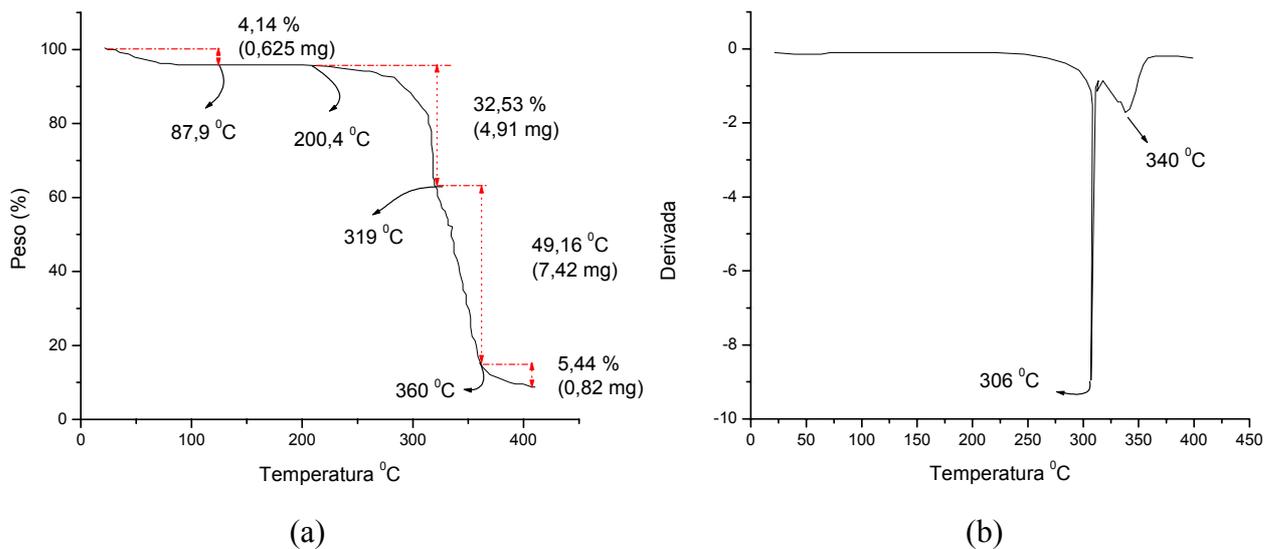


Figura 6.29 – Termogravimetria (a) e termogravimetria diferencial (b) para polpa de sisal.

Nota-se, assim como aconteceu para a polpa de bambu, uma evaporação da água relativa a 4,14 % do peso inicial da amostra até a temperatura de 87,9 °C. Na tabela 6.14 são apresentados os diferentes componentes químicos das fibras de sisal os quais estão susceptíveis a degradarem-se mediante a elevação da temperatura.

Tabela 6.14 – Composição química do sisal. (Sydenstricker et al., 2003).

Substância	Conteúdo (%)
α -celulose	73,00
hemicelulose	10,1
lignina	7,6
extrativos	6,2
Inorgânicos*	3,1

*Ca, K, Mg, sulfatos, fostatos, silicatos, carbonatos etc.

A partir de 87,9 °C há um comportamento constante, sem perda de massa, até a temperatura de 200,4 °C onde se dá início a degradação, provavelmente, da hemicelulose. Esta perda de massa, que é de 32,53 %, ocorre até 319 °C como pode ser observado pelo pico de 306 °C na termogravimetria diferencial. Entre 319 °C e 360 °C ocorre outra etapa da degradação a qual deve ser referente à α -celulose. Esta segunda etapa de degradação de componentes celulósicos pode ser comprovada através do segundo pico da derivada. Após a temperatura de 400 °C resta apenas 8,73 % da amostra.

6.3.

Compósito cimentício reforçado por polpa de eucalipto (CPE)

6.3.1.

Análise mecânica

Os resultados para o ensaio de impacto charpy estão expostos na tabela 6.15. Mais uma vez nota-se um aumento da tenacidade em comparação a matriz sem reforço, a qual para o CPE é de 31,11% (CPE8T). Este incremento da tenacidade é um pouco inferior ao encontrado para o CPB o qual foi de 46,6 % para o CPB14T.

Tabela 6.15 – Resultados de teste de impacto Charpy para CPE.

Corpos-de-prova	Força Máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,35±0,11	0,31±0,05	0,05±0,01	0,45 ± 0,09
CPE8T	0,42±0,11	0,21±0,04	0,08±0,01	0,59±0,06
CPE8C	0,3±0,12	0,31±0,23	0,06±0,01	0,48±0,06
CPE14T	0,31±0,16	0,30±0,14	0,065±0,013	0,50±0,10
CPE14C	0,28±0,1	0,32±0,1	0,07±0,02	0,53±0,12

Também para o CPE notou-se uma mesma tenacidade para os compósitos reforçados por 8% e 14% de fração em massa. Algumas hipóteses propostas para os compósitos reforçados por polpa de bambu também podem ser sugeridas para o CPE, as quais são:

1 – Processo de fabricação: para os compósitos CPE de forma análoga ao ocorrido para o CPB e CPS foi verificado através de microscopia eletrônica de varredura a formação de aglomerados de fibras, como pode ser visto na figura 6.30. Estes aglomerados são, como já explicado anteriormente, decorrentes do processo de fabricação o qual necessita ainda de ajustes para que se consiga uma melhor dispersão das fibras.

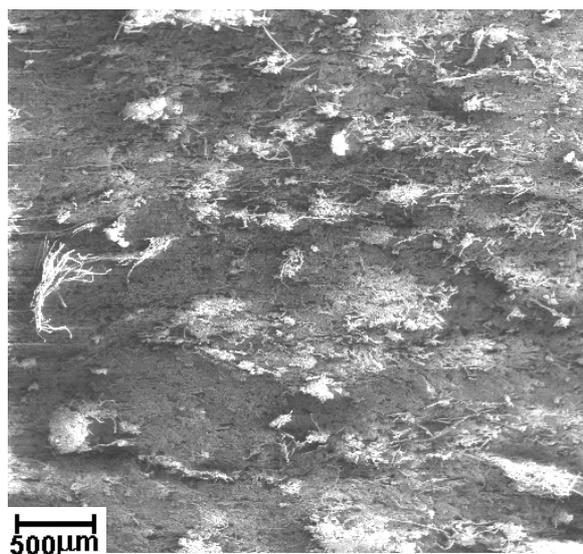


Figura 6.30 – Aglomeração das fibras no compósito CPE14.

2 – Tamanho das fibras abaixo do comprimento crítico: o pequeno comprimento da polpa de eucalipto, o qual de acordo com Fordos et al.(1986) pode variar de 0,9 à 1,2 mm, está abaixo do comprimento crítico como pode ser observado na tabela 6.16. O cálculo do comprimento crítico assim como da tensão de adesão interfacial para este compósito está detalhado no anexo C.

Tabela 6.16 – Resultados da tensão de adesão interfacial e comprimento crítico do CPE.

Corpo-de-prova	τ (mPa)	L_c (mm)
CPE8T	3,15	1,27
CPE8C	2,17	1,84
CPE14T	2,03	1,97
CPE14C	2,09	1,91

O comprimento da fibra estando abaixo do seu comprimento crítico não permite que esta absorva toda tensão a qual suportaria. Desta maneira um maior volume de fibras pode não resultar em uma maior tenacidade.

3 – Elevada taxa de deformação do ensaio de impacto: como visto anteriormente a taxa de deformação no ensaio de impacto é de $14,4 \text{ s}^{-1}$ fato este que pode contribuir para um não incremento da tenacidade para os compósitos com 14% de fração em massa. Em taxas de deformação menores o dano é acumulado

de forma gradual enquanto que em taxas maiores o dano não tem tempo suficiente de se desenvolver. Dessa forma, o processo de acumulação de dano tem um efeito reduzido com o aumento da taxa de deformação.

Na tabela 6.17 podem ser vistos os resultados para o ensaio de flexão em 3 pontos. Para os compósitos reforçados por 8% de fração em massa há um aumento da tenacidade de 18 vezes quando comparado com a matriz sem reforço enquanto que para os compósitos reforçados por 14% há um aumento de 56 vezes.

Tabela 6.17 – Resultados de teste de flexão em 3 pontos para o compósito CPE.

Corpos de prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,06±0,01	0,13±0,02	5,07±2,0	11,66±2,3	0,004±0,001	0,015±0,006
CPE8T	0,14±0,01	0,56±0,06	10,1±0,7	6,01±0,6	0,08±0,01	0,28 ± 0,06
CPE8C	0,12±0,01	0,48±0,1	8,6±0,76	6,54±0,51	0,07±0,01	0,24 ± 0,06
CPE14T	0,15±0,02	1,2±0,28	10,66±1,5	3,55±0,62	0,244±0,05	0,83 ± 0,18
CPE14C	0,12±0,013	1,21±0,22	8,77±0,96	3,81±0,61	0,242±0,06	0,84 ± 0,20

Os resultados obtidos neste trabalho para a tenacidade do CPE estão abaixo daqueles obtidos por Coutts (1987) no qual para compósitos reforçados por 8% de fração em massa a tenacidade encontrada foi de $1,37 \pm 0,24 \text{ kJ/ m}^2$ e $1,68 \pm 0,21 \text{ kJ/ m}^2$ para os compósitos reforçados por 12%. Esta baixa tenacidade pode ser explicada tanto por falhas no processo de fabricação quanto por diferenças no comprimento e na resistência à tração das fibras utilizadas nos dois trabalhos assim como a qualidade do cimento usado nos dois trabalhos.

Para o módulo de ruptura nota-se um aumento de aproximadamente 2 vezes em relação a matriz sem reforço. Os resultados para as diferentes proporções de fibra são praticamente os mesmos, fato este que esta de acordo com os resultados encontrados por Coutts (1987). Porém neste trabalho os valores do módulo de ruptura foram a metade dos encontrados por Coutts (1987). Coutts (1987) encontrou para o compósito reforçado por 8%, módulo de ruptura no valor de $20,3 \pm 2,5 \text{ MPa}$ e $20,6 \pm 2,2 \text{ MPa}$ para o compósito reforçado por 12%. Mais

uma vez essa diferença pode ser explicada pelo processo de fabricação, qualidade do cimento e diferenças nas propriedades mecânicas e geométricas das fibras utilizadas. Já, Pereira (2004) obteve para o módulo de ruptura de compósitos cimentícios reforçados por 7% de fibras de eucalipto (7 mm de comprimento de fibra e corpo-de-prova de geometria 40 x 40 x 160 mm) em relação a massa de cimento, $4,3 \pm 0,35$ MPa aos 90 dias. Valor este aproximadamente a metade ao encontrado neste trabalho.

A tenacidade teórica foi calculada através das equações 6.23 e 6.25 para os compósitos CPE. Os resultados podem ser vistos na tabela 6.18. Foi utilizado o fator de eficiência de 0,41 proposto por Romualdi e Mandel (1964). Utilizou-se para tensão de adesão interfacial o valor de 2,17 MPa, valores de comprimento de fibra de 1,0 mm (Fordos, 1986) e diâmetro de 0,0200 mm (Fordos, 1986).

Tabela 6.18 - Resultados para a tenacidade (R) experimentais e analíticas do CPB (kJ/m^2)

Corpos-de-prova	Experimental		Analítico	
	Flexão	Impacto	Eq. 6.23	Eq. 6.25
CPE8	$0,28 \pm 0,06$	$0,59 \pm 0,06$	0,55	0,54
CPE14	$0,84 \pm 0,20$	$0,53 \pm 0,12$	0,79	0,77

Para o CPE nota-se que os valores provenientes das duas equações, 6.23 e 6.25 estão bem próximos, o que mostra a validade das duas equações e também demonstra que tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à tração da fibra utilizados no cálculo estão bem coerentes com a realidade da fibra utilizada. Entretanto, para o compósito com 8% de reforço os resultados analíticos estão mais próximos da tenacidade obtida através do ensaio de impacto, já para o compósito com 14 % de reforço a situação é inversa.

As propriedades físicas são apresentadas na tabela 6.20. Pode-se notar que a densidade é praticamente a mesma em relação aos compósitos reforçados por polpa de bambu e sisal. Em contrapartida a capacidade de absorção de água é menor em relação aos outros compósitos, fato este que favorece a utilização do CPE em aplicações exteriores, isto é, submetidas a ação do tempo.

Tabela 6.19 – Índices físicos para CPE.

Corpos-de-prova	Densidade (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
CPE8	1360±80	19,43±5,1	14,46±4,35
CPE14	1170±70	27,74±3,6	23,88±3,95

6.3.2. Análise microestrutural

Os modos de falha para o CPE observados no MEV foram os mesmos dos encontrados para o CPB e CPS, ou seja, arrancamento e fratura das fibras. O modo de falha predominante observado para o ensaio de impacto foi o de arrancamento das fibras, para o ensaio de impacto. Na figura 6.31 pode-se ver os vazios deixados pelas fibras arrancadas depois de serem ensaiadas ao impacto.

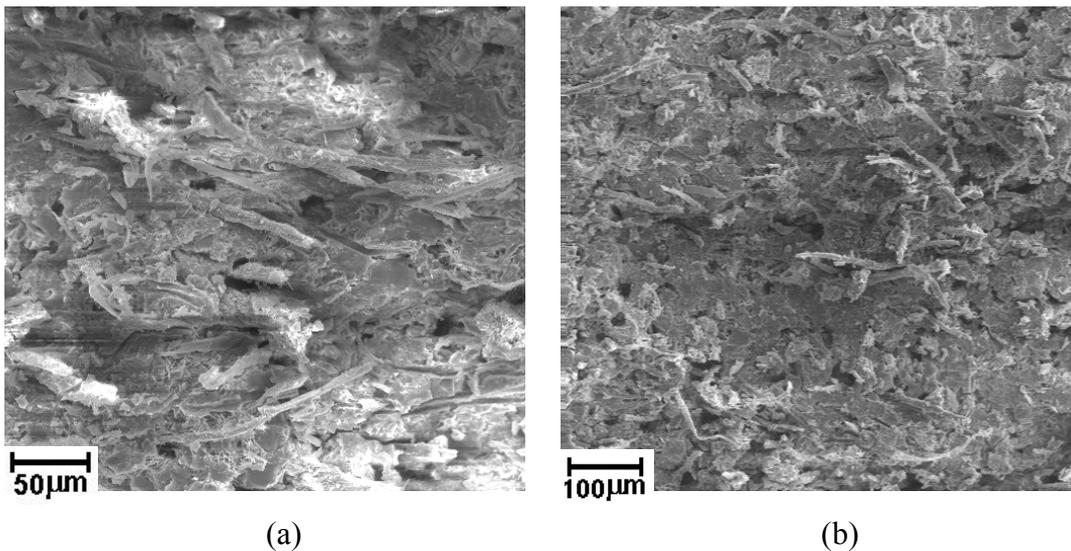


Figura 6.31 - Compósitos (a)CPE14 e (b) CPE8 fraturados por ensaio de impacto.

Como pode ser visto na figura 6.32 para os compósitos submetidos ao ensaio de flexão existem fibras fraturadas, vazios e várias marcas de impressão as quais demonstram que fibras foram arrancadas, descoladas lateralmente. O modo de fratura predominante também foi o de arrancamento para o ensaio de flexão.

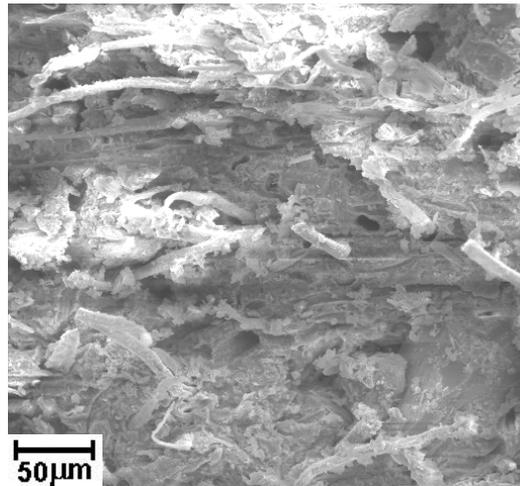


Figura 6.32 – Compósito CPE8 fraturado por ensaio de flexão.

6.3.3. Propriedades térmicas

6.3.3.1. Análise termogravimétrica (TGA)

Os gráficos de termogravimetria e termogravimetria diferencial estão apresentados nas figuras 6.33 (a) e (b), respectivamente.

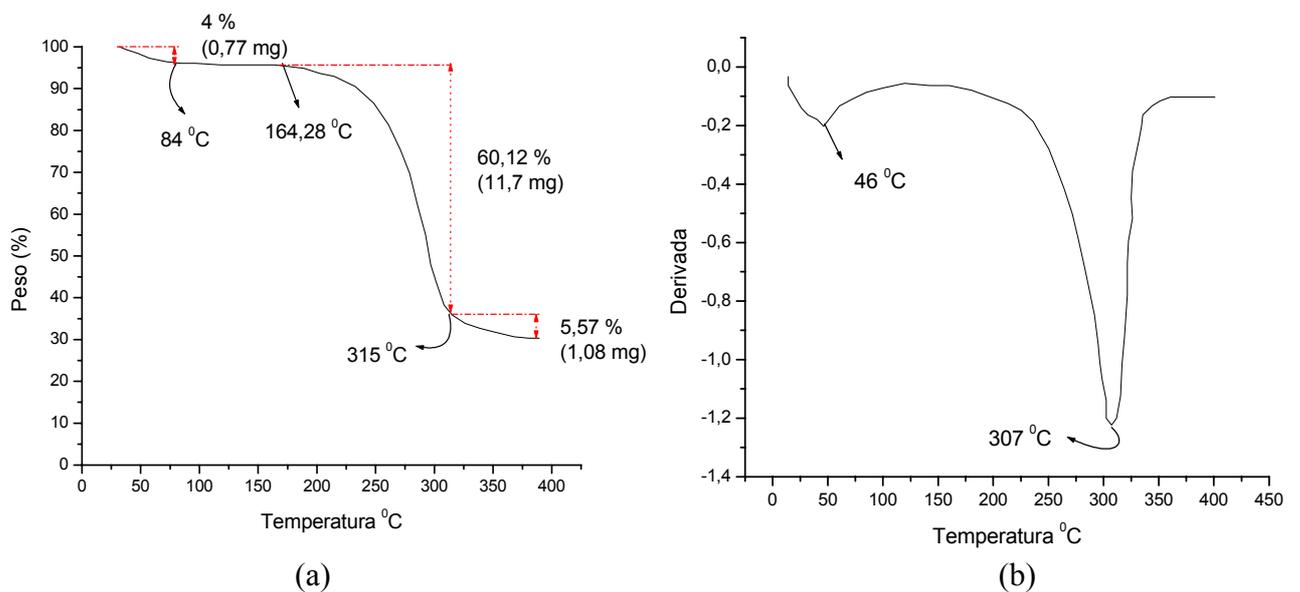


Figura 6.33 – Termogravimetria (a) e termogravimetria diferencial (b) para polpa de eucalipto.

Observa-se uma perda de água de 4% até a temperatura de 84 °C, fenômeno este já observado nos compósitos CPB e CPS. A partir de 164,28 °C ocorre o início da degradação térmica da fibra. A curva de DTG mostra uma certa assimetria, sendo mais aberta para menores temperaturas. Este comportamento pode estar associado a degradação inicial da hemicelulose. O pico de 307 °C na curva de DTG reflete a degradação da α -celulose, que se encontra em maior quantidade no eucalipto como pode ser visto na tabela 6.20. Após a temperatura de 400 °C restaram 30,31 % da amostra. O eucalipto, em comparação com a polpa de bambu e sisal, tem um início de degradação inferior ao da polpa de bambu (166 °C) e da polpa de sisal (200,4 °C), entretanto o eucalipto parece possuir um maior teor de cinzas (inorgânicos), fato este demonstrado pela maior quantidade de amostra restante após o ápice de temperatura atingido.

Tabela 6.20- Composição química do eucalipto. Fordos et al.(1986).

Substâncias	%
α -celulose	85
hemicelulose	15
lignina	0

6.4.

Compósito cimentício reforçado por fibras curtas de sisal (CPFS)

6.4.1.

Análise mecânica

Os resultados para o ensaio de impacto Charpy são apresentados na tabela 6.21. Houve um aumento da tenacidade de 26,4 % em relação a matriz sem reforço. O valor da tenacidade para o CPFS está bem próximo ao encontrado pelo CPB e pelo CPS. Para este compósito foi estudada apenas a fração volumétrica de 3% e as fibras usadas tinham um comprimento de 25 mm. Esta fração volumétrica corresponde em massa a 1,7 %, porém de acordo com Tolêdo filho (1997) existe um comprometimento na trabalhabilidade se for utilizado um volume de fibras superior a este. Este fato também foi notado durante o procedimento experimental neste trabalho. Calculou-se para este compósito a sua tensão de adesão interfacial e o seu comprimento crítico. O primeiro tem valor de 2,85 MPa e o segundo 28 mm, cálculos estes que se encontram no anexo C. O comprimento crítico calculado por Tolêdo Filho (1997) é de 25 mm valor este igual ao comprimento das fibras usadas neste trabalho.

Tabela 6.21 – Resultados de teste de impacto Charpy para CPARG e CPFS.

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CPARG	0,42±0,24	0,26±0,28	0,06±0,02	0,53±0,18
CPFS	0,29±0,1	0,42±0,17	0,07±0,02	0,67±0,16

Na tabela 6.23 encontram-se os resultados para o ensaio de flexão em 3 pontos. Observa-se um aumento de 7 vezes na tenacidade em comparação a matriz sem reforço. Nota-se porém um valor bastante baixo da tenacidade se comparado com o compósito reforçado por polpa de sisal. Este fato pode ser explicado pela menor fração de massa de fibras utilizada, apenas 1,7 % para o CPFS em comparação a 8% e 14% para o CPS e pela diferença da matriz que no caso do CPFS foi argamassa. O maior comprimento das fibras de sisal utilizadas para o CPFS não foi suficiente para aumentar a tenacidade, nem no ensaio de impacto,

tampouco no ensaio de flexão. A pequena espessura do compósito, de apenas 6 mm, não é propícia para a utilização de fibras desta magnitude de comprimento. Este fato comprometeu tanto a tenacidade quanto o módulo de ruptura, que foi menor para a matriz com reforço em relação a matriz sem reforço como pode ser visto na tabela 6.22.

Tabela 6.22 – Resultados de teste de flexão em 3 pontos para CPARG e CPFS.

Corpos de prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CPARG	0,09±0,02	0,18±0,06	8,07±1,3	14,02±3,24	0,01±0,004	0,04 ± 0,01
CPFS	0,09±0,02	0,3±0,08	7,3±0,78	6,58±2,23	0,07±0,03	0,28 ± 0,11

Rodrigues (1999) também notou em seu trabalho, embora com corpos-de-prova de geometria diferente e com entalhe e ensaio de flexão em 4 pontos, que a adição de fibras de sisal de 25 mm e 45 mm não alterou a capacidade de carga da argamassa plena a qual foi da ordem de 3000 N.

As fórmulas analíticas, equações 6.23 e 6.25, parecem apenas ser adequadas para avaliar a tenacidade em compósitos reforçadas por microfibras em que o comprimento da fibra seja menor que o seu comprimento crítico. Este fato pode ser comprovado através dos cálculos mostrados na tabela 6.23.

Tabela 6.23 - Resultados para a tenacidade (R) experimentais e analíticas do CPFS (kJ/m²).

Corpos-de-prova	Experimental		Analítico	
	Flexão	Impacto	Eq. 6.23	Eq. 6.25
CPFS	0,28 ± 0,11	0,67 ± 0,16	18,36	18,99

Foi encontrado para a tenacidade analítica valor de duas ordens de grandeza acima dos encontrados experimentalmente comprovando assim a não adequação destas fórmulas para comprimentos da ordem de grandeza utilizadas.

Os índices físicos são apresentados na tabela 6.24. Nota-se para os compósitos CPFS um aumento na densidade quando comparado com os outros compósitos analisados até este momento. A capacidade de absorção de água assim como a porosidade aparente também apresentam valores inferiores.

Tabela 6.24 – Índices físicos para CPARG e CPFS.

Corpos-de-prova	Densidade (Kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
CPARG	1980±20	20,74±1,31	10,5±0,75
CPFS	1700±28	18,49±6,97	12,37±8,96

6.4.2. Análise microestrutural

Pode-se notar pela figura 6.34, correspondente ao compósito fraturado após ensaio de impacto, que realmente a quantidade de fibras era pequena em relação aos outros compósitos. É possível observar também cavidades de diferentes tamanhos, as maiores indicam fibras arrancadas e as menores, porosidade da matriz. Os modos de falha são o de fratura e arrancamento de fibras sendo o arrancamento predominante.

Fibra arrancada

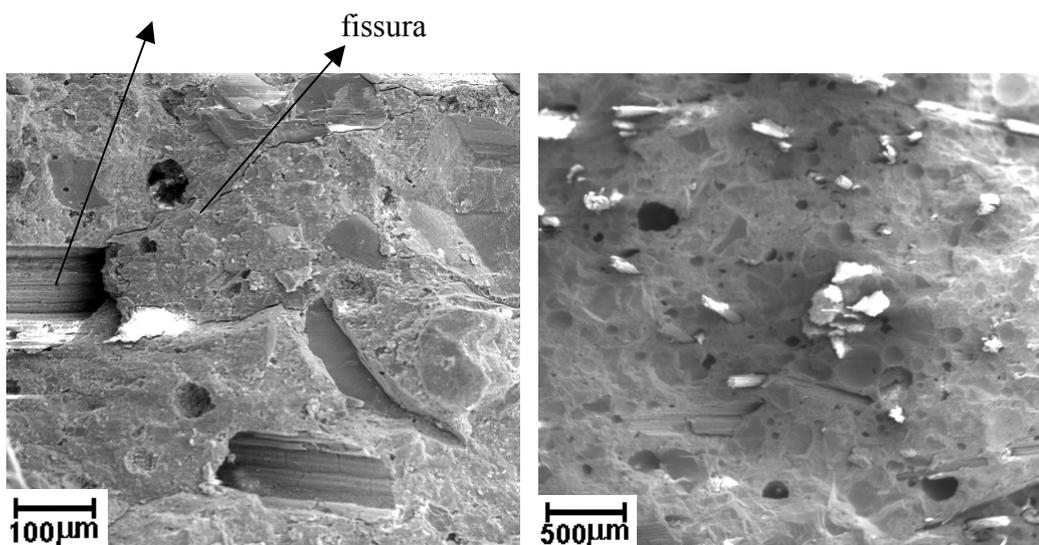


Figura 6.34 – Compósitos CPFS fraturados por ensaio de impacto.

A figura 6.34 também mostra uma fissura atingindo uma fibra a qual foi arrancada da matriz. Pela figura 6.35, a qual corresponde a um corpo-de-prova fraturado após ensaio de flexão, vê-se também uma menor quantidade de fibras fraturadas em relação às arrancadas. É possível também notar pela figura 6.35 (a) uma fibra que por estar mais bem aderida a matriz foi fraturada em sua parte central. Pode-se ver a ampliação em 6.35 (b) da formação da fissura na fibra a qual não foi suficiente para quebrar a fibra em duas partes, fato este que demonstra a alta resistência à tração do sisal.

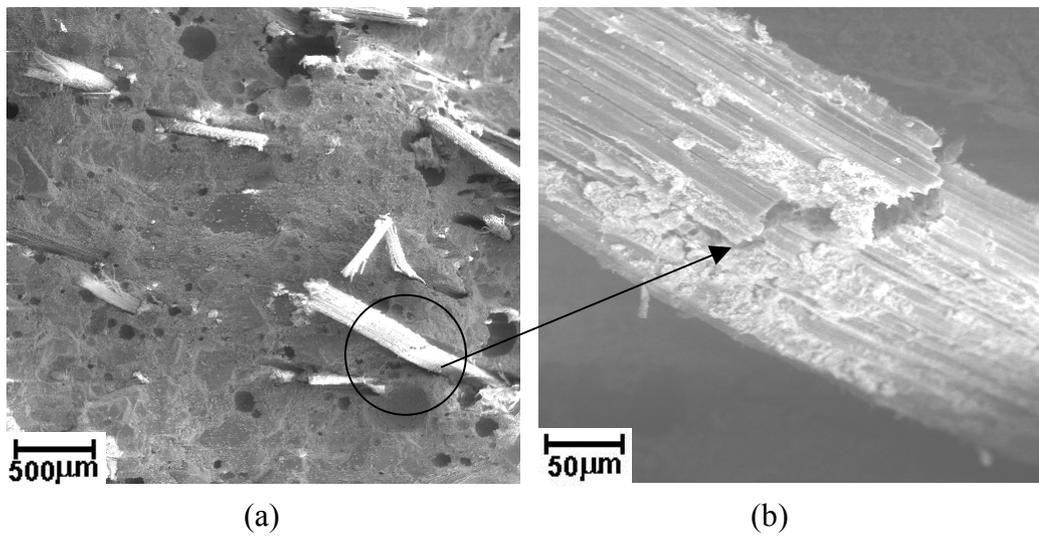


Figura 6.35 – (a) Compósito CPFS fraturado por ensaio de flexão. (b) Detalhe da fibra fraturada.

6.5.

Compósito cimentício reforçado por wollastonita (CPW)

6.5.1.

Análise mecânica

Os resultados do ensaio de impacto são apresentados na tabela 6.25, onde pode-se notar uma melhora de 28,8 % em relação a matriz sem reforço. Devido a pequena razão de aspecto da wollastonita, era de se esperar um menor valor de tenacidade em relação ao encontrado para os outros compósitos. Porém a alta taxa de deformação do ensaio de impacto pode estar tirando um pouco da sensibilidade deste ensaio e obtendo-se assim resultados muito próximos para os diferentes compósitos.

Tabela 6.25 – Resultados de teste de impacto Charpy para CPW.

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,35±0,11	0,31±0,05	0,05±0,01	0,45 ± 0,09
CPW	0,48±0,16	0,15±0,03	0,06±0,01	0,58±0,12

Na tabela 6.26 encontram-se os resultados do ensaio de flexão em 3 pontos. Há um aumento, para a tenacidade, de 6 vezes do CPW em relação a matriz. Neste ensaio, pode ser observado a baixa performance da tenacidade do CPW em comparação aos outros compósitos. Como foi dito antes, isto é devido à pequena razão de aspecto da wollastonita.

Tabela 6.26 – Resultados de teste de flexão em 3 pontos para CPW.

Corpos de prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,06±0,01	0,13±0,02	5,07±2,0	11,66±2,3	0,004±0,001	0,015±0,006
CPW	0,16±0,07	0,2±0,07	16,22±1,2	13,73±1,3	0,03±0,004	0,1±0,016

De acordo com Low e Beaudoin (1994b) a tenacidade do CPW devido a flexão em 3 pontos é aumentada em 2 vezes em relação a matriz sem reforço.

No trabalho de Low e Beaudoin (1993a) foi encontrado para o módulo de ruptura da pasta de cimento reforçado com wollastonita grade NYAD G (L/d = 15:1) o valor de aproximadamente 20 MPa, porém é necessário observar que o valor do módulo de ruptura obtido pela matriz variava de 10,3 MPa a 13,7 MPa. Nota-se então uma melhora de aproximadamente 2 vezes para o módulo de ruptura obtido por Low e Beaudoin (1993a) enquanto que neste trabalho houve uma melhora de pouco mais de 3 vezes em relação a matriz sem reforço. Esta diferença pode estar relacionada ao menor fator água cimento utilizado nesta pesquisa uma vez que de acordo com Low e Beaudoin (1993b) a razão de aspecto da wollastonita não altera a resistência a flexão.

Os valores das tenacidades obtidas de forma analítica e experimental são reportadas na tabela 6.27. Na literatura não é encontrado um valor de resistência à tração da wollastonita, sendo assim utilizou-se equação 6.25 para calcular a resistência à tração da fibra. Sendo a tração a única variável desconhecida na equação 6.25, tentou-se vários valores até que as duas equações, 6.23 e 6.25, convergiram. O valor de tração encontrado para a wollastonita foi de 400 MPa. A partir deste valor e da tensão interfacial calculada no anexo C pode-se também calcular o comprimento crítico, o que foi de 32,88 μm .

Tabela 6.27 - Resultados para a tenacidade (R) experimentais e analíticas do CPW (kJ/m^2).

Corpos-de-prova	Experimental		Analítico	
	Flexão	Impacto	Eq. 6.23	Eq. 6.25
CPW	0,1±0,016	0,58±0,12	0,09	0,09

Apesar do comprimento da wollastonita ser maior que o seu comprimento crítico, esta possui elevada tensão interfacial o que faz que o seu modo de falha seja a fratura. Este fato aliado ao pequeno comprimento da fibra resulta em um baixo valor da tenacidade observado nos ensaios de flexão e através da equação 6.23. No ensaio de impacto, devido a grande taxa de deformação, o comportamento a tenacidade encontrada foi superior a esperada.

Pode-se observar os índices físicos do CPW através da tabela 6.28. Nota-se uma elevada densidade decorrente da alta densidade da wollastonita (2900 kg/cm^3). A absorção de água do CPW é bem reduzida se comparada a dos compósitos reforçados por fibras vegetais.

Tabela 6.28 – Índices físicos do CPW.

Corpos-de-prova	Densidade (Kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
CPW	1880 ± 60	$18,65 \pm 3,02$	$9,89 \pm 1,89$

6.5.2. Análise microestrutural

Através de observações no microscópio eletrônico de varredura nota-se que o único modo de falha existente é o de fratura das fibras de wollastonita. Pode-se ver com bastante clareza através da figura 6.36, a qual retrata um corpo-de-prova após ensaio de impacto, as fibras de wollastonita fraturadas.

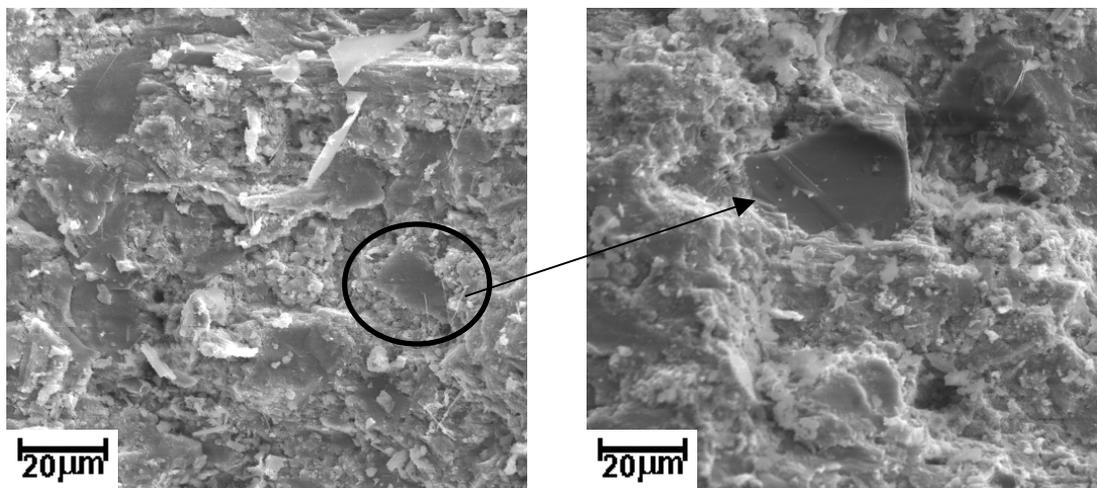


Figura 6.36 – Fibras fraturadas no compósito CPW por ensaio de impacto.

Pela figura 6.37, pode-se verificar que para o ensaio de flexão o modo de falha também é apenas a fratura da fibra. Porém, nota-se que no ensaio de impacto as fraturas das fibras ocorrem no plano de falha da matriz, já na flexão observa-se algumas fraturas fora do plano, como retratado na figura 6.37.

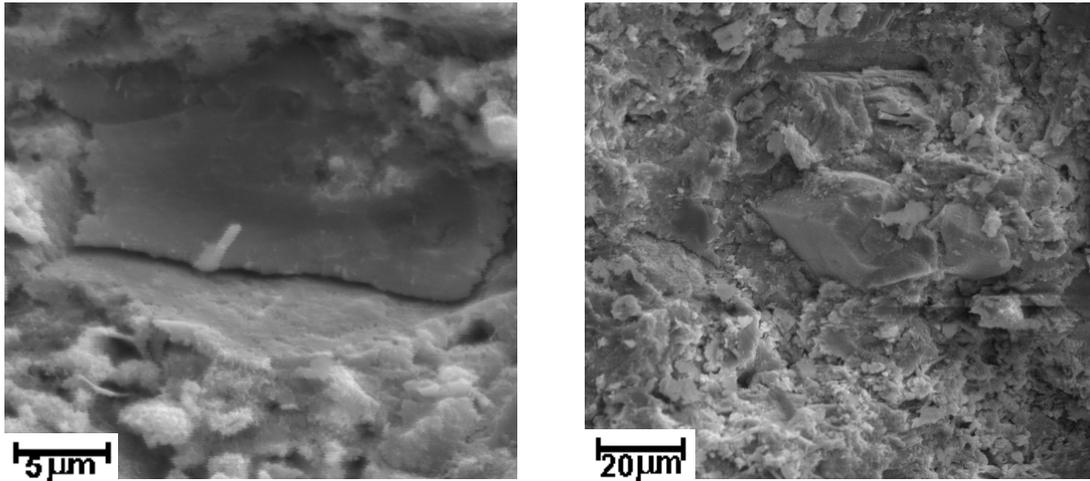


Figura 6.37 – Fibras fraturadas fora do plano no compósito CPW, submetido a ensaio de flexão.

É importante notar que a dispersão da wollastonita é bem homogênea o que pode ser explicado pela sua menor razão de aspecto em comparação a das fibras vegetais e pela sua densidade (2900 kg/cm^3) ser bem próxima a do cimento (3150 kg/cm^3). Este fato sugere que a wollastonita é melhor indicada do que as fibras vegetais, as quais necessitam de processos bem elaborados de dispersão, para ser utilizada como reforço em matrizes cimentícias produzidas através do processo Hatschek.

6.6.

Compósito cimentício híbrido reforçado por bambu e wollastonita (CPBW)

6.6.1.

Análise mecânica

6.6.1.1.

Impacto Charpy

O objetivo de se criar um compósito híbrido reforçado por wollastonita e bambu foi o de conjugar a alta tensão de adesão interfacial da wollastonita para se atingir um alto módulo de elasticidade e, ao mesmo tempo, melhorar a tenacidade através da inserção da polpa de bambu. Entretanto, como se pode observar através da tabela 6.29 a resistência ao impacto é praticamente a mesma obtida pelo compósito CPB.

Tabela 6.29 – Resultados de teste de impacto Charpy para CPBW.

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,35±0,11	0,31±0,05	0,05±0,01	0,45 ± 0,09
CPBW8T	0,34±0,12	0,31±0,22	0,07±0,01	0,65±0,06
CPBW8C	0,29±0,13	0,33±0,13	0,06±0,01	0,62±0,11
CPBW14T	0,2±0,086	0,36±0,12	0,07±0,01	0,67±0,12
CPBW14C	0,14±0,032	0,55±0,20	0,07±0,01	0,64±0,07

Esta semelhança nos resultados, tanto entre os diferentes compósitos CPB e CPBW como para as diferentes frações em massa de reforço, pode ser atribuída à alta taxa de deformação do ensaio de impacto.

6.6.1.2.

Flexão em 3 pontos

Os resultados para o ensaio de flexão em 3 pontos podem ser vistos na tabela 6.30. Quando comparados à matriz sem reforço, o CPBW14T (compósito o qual apresentou maior valor de tenacidade) apresentou um incremento da tenacidade de 145 vezes e o CPBW8T (compósito o qual apresentou maior valor de módulo de ruptura) apresentou um aumento do módulo de ruptura de 60,15%.

Estes resultados mostram que este compósito híbrido apresenta boas perspectivas de emprego prático.

Tabela 6.30 – Resultados de teste de flexão em 3 pontos para CPBW.

Corpos-de-prova	Força máxima (kN)	Deslocamento máximo (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
CP0	0,06±0,01	0,13±0,02	5,07±2,0	11,66±2,3	0,004±0,001	0,015±0,006
CPBW8T	0,08±0,02	0,33±0,07	8,12±1,2	7,15±1,26	0,05±0,015	1,27±0,28
CPBW8C	0,07±0,009	0,5±0,20	6,54±0,65	5,38±1,22	0,06±0,01	1,39±0,22
CPBW14T	0,07±0,03	1,07±0,30	6,7±2,38	2,24±0,82	0,09±0,028	2,18±0,62
CPBW14C	0,04±0,01	0,96±0,19	3,61±0,81	1,24±0,52	0,06±0,01	1,41±0,24

Também em comparação ao CPB, CPBA e CPW houve uma melhoria na tenacidade. Para o módulo de ruptura observa-se um comportamento similar do CPBW e do CPB, porém quando comparado ao CPW o valor é inferior. O incremento na tenacidade pode ser atribuído a uma perda da adesão interfacial da wollastonita, a qual pode ser atribuída ao atraso do tempo de pega do cimento causado pela polpa de bambu. Pereira (2004) relata em seu trabalho estudo sobre o retardamento da reação de hidratação do cimento causada por fibras de eucalipto, pinho e cortiça. Esta redução na tensão interfacial da wollastonita levou a que um maior número de fibras de wollastonita falhassem por arrancamento contribuindo assim para um incremento na tenacidade e uma diminuição do módulo de ruptura. Por este motivo não se atingiu um módulo de ruptura de valor igual ao atingido pelo CPW, porém a tenacidade obtida foi superior tanto ao do CPW como a do CPB.

Para o compósito CPBW desenvolveu-se uma nova equação adaptada das equações 6.23 e 6.25 para determinar de forma teórica a tenacidade do compósito. Entretanto, com a modificação da tensão de adesão interfacial da wollastonita devido ao retardamento do tempo de pega causado pela adição da polpa de bambu, o valor desta tensão para a wollastonita, determinado no item anterior pode não ser o correto para esta formulação.

As seguintes equações são propostas para o cálculo da tenacidade em compósitos híbridos:

$$R = \frac{\eta v_{f1} L_1^2 \tau_1}{6d_1} + \frac{\eta v_{f2} L_2^2 \tau_2}{6d_2} + \left[v_m + \eta \frac{v_{f1} L_1}{d_1} + \eta \frac{v_{f2} L_2}{d_2} \right] R_m \quad (6.26)$$

$$R = \frac{\eta v_{f1} L_1^2 \tau_1}{6d_1} + \frac{\eta v_{f2} L_2^2 \tau_2}{6d_2} + v_m R_m + (\eta v_{f1}) \frac{\sigma_{f1}^3 d_1}{32 E_{f1} \tau_1} + (\eta v_{f2}) \frac{\sigma_{f2}^3 d_2}{32 E_{f2} \tau_2} \quad (6.27)$$

onde,

L_1 = comprimento da polpa de bambu.

d_1 = diâmetro da polpa de bambu.

τ_1 = tensão de adesão interfacial do bambu.

E_{f1} = módulo de elasticidade da fibra de bambu.

σ_{f1} = resistência à tração da fibra de bambu

v_{f1} = fração volumétrica da fibra de bambu

L_2 = comprimento da wollastonita.

d_2 = diâmetro da wollastonita.

τ_2 = tensão de adesão interfacial da wollastonita.

E_{f2} = módulo de elasticidade da wollastonita.

σ_{f2} = resistência à tração da wollastonita

v_{f2} = fração volumétrica da wollastonita

Para os cálculos da tenacidade teórica foram utilizados fator de eficiência de 0,41 e tensão de adesão interfacial da wollastonita de 60,81 MPa e do bambu 0,53 MPa. Pode-se observar os resultados das tenacidades obtidas de forma experimental e analítica na tabela 6.31.

Tabela 6.31 - Resultados para a tenacidade (R) experimentais e analíticas do CPBW (kJ/m²).

Corpos-de-prova	Experimental		Analítico	
	Flexão	Impacto	Eq. 6.26	Eq. 6.27
CPBW8	1,27±0,28	0,65±0,06	1,16	0,71
CPPBW14	2,18±0,62	0,67±0,12	1,32	1,02

Foram encontrados mediante cálculo feito a partir da equação 6.26 valores similares aos obtidos no ensaio de flexão enquanto que para a equação 6.27 foram achados resultados mais próximos aos dos encontrados no ensaio de impacto. Fato interessante é o que foi utilizada a tensão de adesão interfacial para a wollastonita igual a encontrada para o CPW. Este valor de tensão de adesão interfacial deveria ser inferior para o CPBW devido a influência do retardamento no tempo de pega. Este fato pode levar a seguinte hipótese:

- O retardamento no tempo de pega pode não estar influenciando a tensão de adesão interfacial.

A diferença dos resultados entre as duas equações pode ser devido ao fato de que na equação 6.27 foram empregados valores do módulo de elasticidade e da resistência a tração das fibras. Os valores, encontrados na literatura, podem conter erros expressivos pois, conforme pode-se ver pela tabela 2.1, as propriedades das fibras apresentam uma larga faixa de valores. O emprego da equação 6.26 evita o uso destes valores.

Os índices físicos dos compósitos podem ser observados na tabela 6.32. Em comparação ao compósito CPB os valores dos índices físicos encontrados para o CPBW são os mesmos. Conclui-se que a adição de wollastonita provocou um aumento na tenacidade em comparação ao CPB sem alterar o seu módulo de ruptura nem tão pouco suas propriedades físicas.

Tabela 6.32 – Índices físicos do CPBW.

Corpos-de-prova	Densidade (kg/m ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
CPBW8	1530±70	31,56±3,68	20,72±2,9
CPBW14	1280±40	38,66±3,1	30,25±3,2

6.6.2. Análise microestrutural

Nota-se através da figuras 6.38, amostra esta ensaiada ao impacto, que existem dois tipos de vazios, um de tamanho maior referente ao arrancamento das fibras de bambu e o segundo de tamanho inferior, referente a porosidade do cimento. Esta porosidade observada para o CPBW é bastante superior a do CPB e do CPW. Mais uma vez foi observado que o modo de falha da fibra de bambu no ensaio de impacto é o arrancamento.

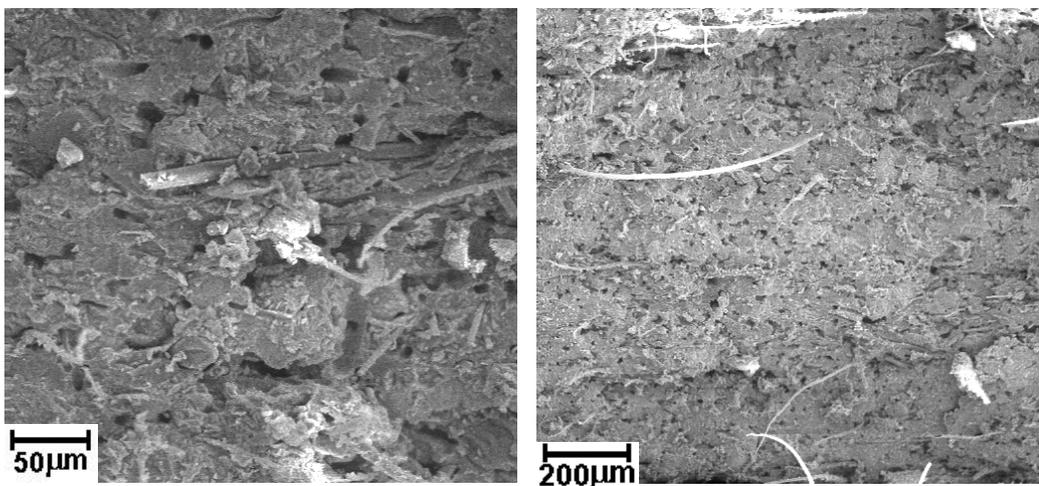


Figura 6.38 – Compósitos CPBW14 fraturado por ensaio de impacto.

Na figura 6.39 (a) e (b) observa-se que na amostra ensaiada ao impacto, a adesão interfacial da wollastonita já não é tão boa quanto a observada no CPW.

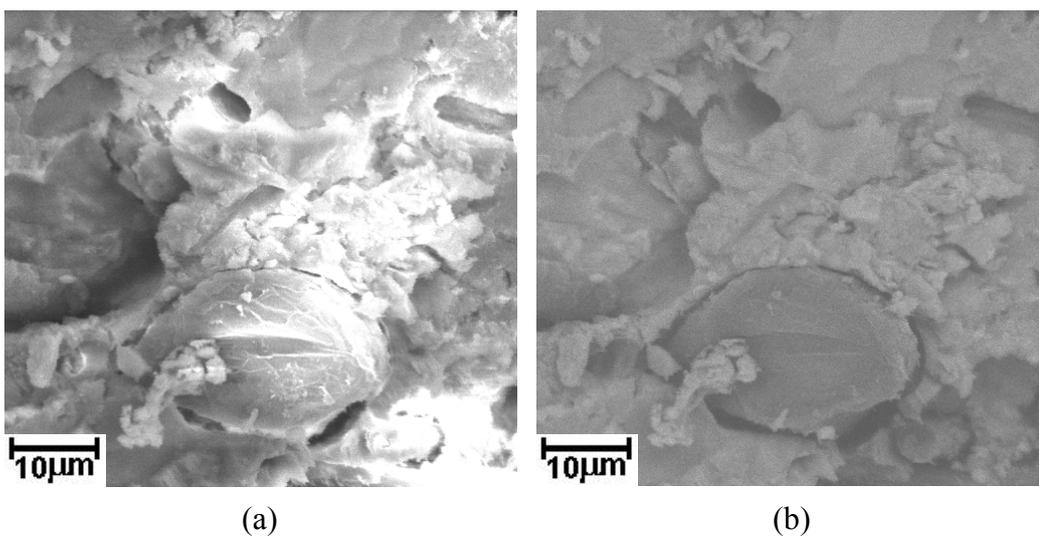


Figura 6.39 – Adesão interfacial da fibra de wollastonita. (a) elétrons secundários (b) elétrons retroespalhados.

As imagens 6.39 (a) e (b) são as mesmas, porém (b) foi obtida através do modo de elétrons retroespalhados, podendo-se desta forma notar de forma mais clara a diferença entre a wollastonita e o cimento.

No ensaio de flexão também foi notado que o modo de falha da fibra de bambu é o arrancamento assim como foi visto uma maior porosidade do cimento como pode ser observado nas figuras 6.40.

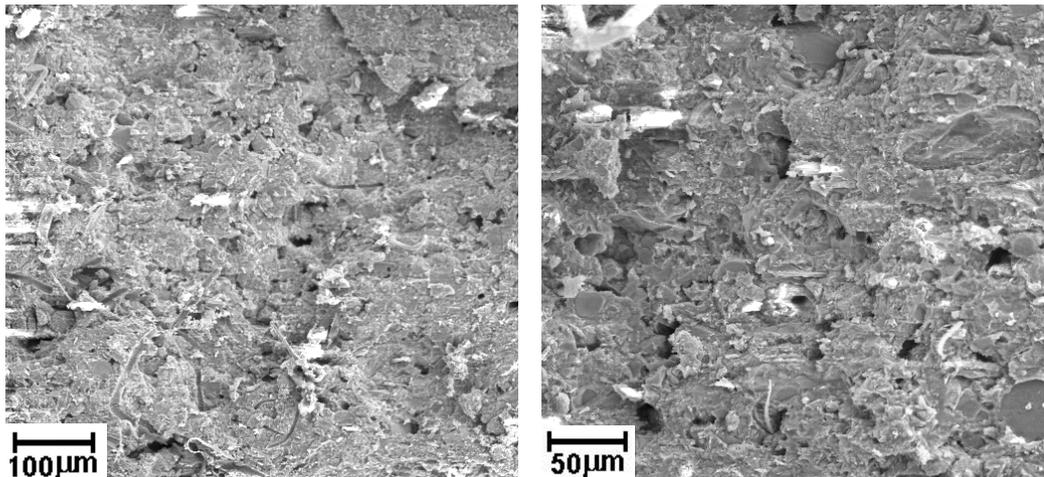


Figura 6.40 – Compósitos CPBW8 fraturados por ensaio de flexão.

Na figura 6.41 observa-se a fibra de wollastonita na matriz cimentícia após ensaio de flexão. Vê-se que a adesão não é tão boa quanto a observada no ensaio de flexão do CPW, porém também é observado que para o CPBW a wollastonita sofre fratura fora do plano no ensaio de flexão da mesma maneira que ocorreu no ensaio de flexão do CPW.

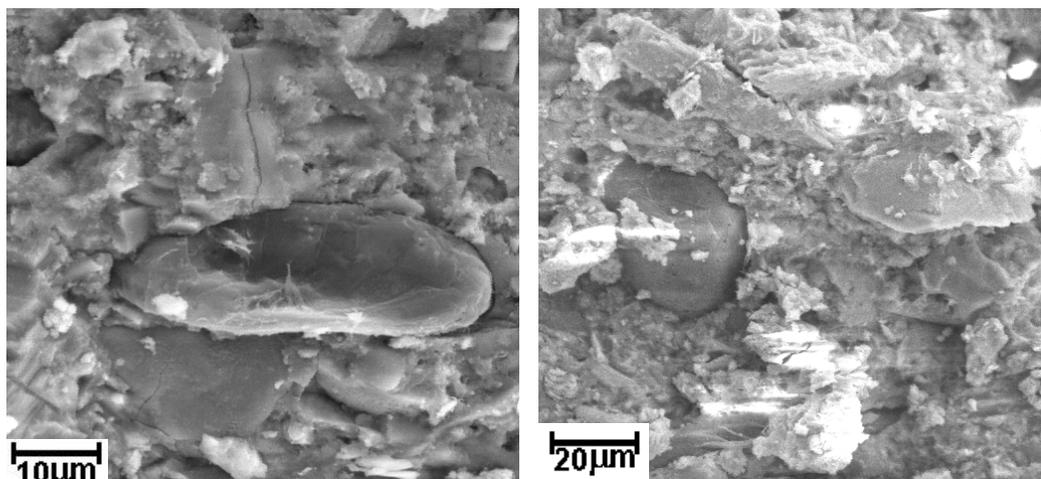


Figura 6.41 – Fibras de wollastonita fraturadas fora do plano por ensaio de flexão.

Para o CPBW foram observadas poucas fibras de wollastonita em comparação às observadas no CPW. Este fato, que pode ser comprovado através das imagens obtidas no MEV e mostradas neste trabalho, indica que as fibras de wollastonita foram arrancadas tanto no ensaio de flexão como no ensaio de impacto. Este arrancamento pode ter sido ocasionado devido ao maior número de poros no cimento, os quais foram observados no MEV ou pelo retardamento do tempo de pega o qual de alguma forma comprometeu a adesão da wollastonita.

6.7.

Comparação dos resultados de módulo de ruptura dos compósitos cimentícios com normas internacionais

Para comprovar a viabilidade do uso dos materiais compósitos cimentícios estudados e desenvolvidos nesta pesquisa pode-se fazer uma simples comparação de algumas normas internacionais com os resultados de módulo de ruptura obtidos. A norma ASTM C 1225 (1993) a qual regula a utilização de cimento reforçado por fibra (diferente de asbesto) para coberturas determina que o valor mínimo do módulo de ruptura para materiais saturados deve ser de 5,5 MPa. Já a norma ASTM C 1325 (1996) que regula a utilização do mesmo material da anterior, só que neste caso para uso interno em áreas secas e molhadas, exige que o menor módulo de ruptura deve ser de 5,17 MPa para compósitos saturados. De acordo com a norma AS 2908.2 (1992), estabelecida para materiais cimentícios reforçados por fibra celulósica, o módulo de ruptura mínimo para materiais saturados e não saturados é de 4 MPa desde que tenham probabilidade de 90 % de ocorrência. Embora não tenham sido feitos ensaios de flexão com os compósitos saturados, alguns dos resultados encontrados neste trabalho são bem superiores aos exigidos pelas normas, um exemplo é o CPBA, que tem valores do módulo de ruptura em torno de 5 vezes superior ao exigido pelas normas.

6.8. Laminado de bambu

6.8.1. Análise mecânica

A tabela 6.33 mostra os resultados experimentais obtidos. Pode-se observar que o valor da tenacidade do BL para o ensaio de impacto foi o dobro daquele obtido no ensaio de flexão.

Tabela 6.33 – Resultados dos testes de impacto Charpy e flexão em 3 pontos.

Teste de impacto Charpy						
Corpos de prova	Força máxima (kN)	Deslocamento na carga máxima (mm)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tenacidade (J)	Tenacidade (kJ/m ²)
BL	0,33±0,1	3,62±0,77	-	-	3,92±1,12	42,54±13,12
Teste de flexão em 3 pontos						
BL	0,77±0,16	7,18±0,97	102,37±18	8,52±2,55	3,66±0,96	19,77±4,70
BLC	2,41±0,35	6,71±1,72	31,67±4,8	1,74±0,30	11,39±3,9	17,63±6,0

Este fato pode ser explicado pela diferença no tamanho dos corpos-de-prova para os diferentes ensaios e pela alta taxa de deformação do ensaio de impacto a qual é de $14,4 \text{ s}^{-1}$. A tenacidade no ensaio de impacto Charpy foi calculada como sendo a integral da curva força x tempo até o instante em que a força máxima foi atingida, como mostra a figura 6.42 e a tenacidade no ensaio de flexão foi calculada como sendo a área sob a curva carga x deslocamento até a carga máxima conforme as figuras B.31 e B.32 no anexo B. Comparando os resultados deste trabalho com o de Li et al. (1996) que realizaram ensaio de impacto Charpy no bambu em condição natural, utilizando a mesma espécie do estudado neste trabalho, porém com vão de 40 mm e energia do pêndulo de 29,4 J, pode-se verificar que os resultados estão na mesma ordem de grandeza. Li et al. (1996)

obtiveram $35,4 \text{ kJ/m}^2$ quando a parte interior do bambu estava tracionada, $125,6 \text{ kJ/m}^2$ quando a parte verde estava tracionada e $91,2 \text{ kJ/m}^2$ quando a parte verde foi retirada e esta região tracionada. Deve-se comparar com este trabalho apenas o corpo-de-prova em que a parte interior estava tracionada e o que a parte verde foi retirada pois são os casos que mais se assemelham ao laminado. Sendo assim o valor de $42,54 \text{ kJ/m}^2$ situou-se muito próximo ao caso em que a parte interior do bambu foi tracionada. Deve-se notar ainda que a dimensão utilizada no ensaio de Li et al. (1996) foi $12 \times h \times 55 \text{ mm}$ (largura x espessura (não informada) x comprimento), e que comprovadamente existe influência no tamanho do corpo-de-prova para ensaios de impacto Charpy (Bader et al., 1974). Já Zhang et al. (2000) reportam uma resistência de 126 kJ/m^2 para o bambu como material natural, porém sem informar maiores detalhes da configuração de ensaio. Para laminados de bambu/alumínio, de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, com 2 camadas de bambu na mesma direção a tenacidade variou de $29,87$ a $80,83 \text{ kJ/m}^2$ e quando estas são dispostas ortogonalmente variou de $29,82$ a $81,29 \text{ kJ/m}^2$ para laminados de bambu/alumínio. É importante notar que para este ensaio a energia utilizada variou de 30 a 80 J e o ensaio de impacto foi o de queda de peso. Testes de impacto realizados por Jain et al. (1992) em corpos-de-prova de $75 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ de compósitos feitos de tiras de bambu posicionadas paralela e ortogonalmente apresentam valores de $45,62 \text{ kJ/m}^2$ e $34,03 \text{ kJ/m}^2$ estando, portanto, bem próximos aos encontrados neste estudo. Tentou-se ensaiar o laminado colado com a energia máxima do equipamento ($5,5 \text{ J}$) sendo que esta não foi suficiente para fraturar o material.

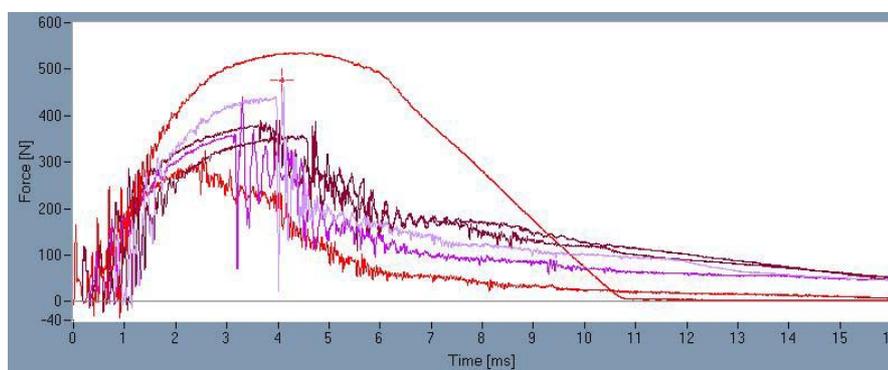


Figura 6.42 – Diagrama carga x tempo do ensaio de impacto Charpy.

Para o laminado colado (BLC), entretanto, foram feitos ensaios de flexão de 3 pontos. Neste a tenacidade foi calculada como a área sob a curva carga x

deflexão até atingir-se a carga máxima, figura B.32, anexo B. Para o laminado colado, apesar da força necessária para fraturar o corpo-de-prova ser quase 3 vezes superior àquela do laminado simples, a tenacidade foi praticamente igual a do laminado. O valor da tenacidade de 22,34 kJ/m² do laminado colado mostrou-se condizente com os valores encontrados por Zhang et al. (2000). Entretanto o valor do módulo de ruptura é cerca de 1/3 da obtida para o laminado simples. Este fato pode ser explicado pela orientação das fibras do bambu na lâmina localizada no meio do laminado, para as quais a orientação era de 90°. De acordo com a teoria de Tsai-Hill (Chawla, 1998), a resistência à tração das fibras diminui à medida que a orientação destas aumenta de 0° a 90°. Outra explicação pode ser dada pela tensão de cisalhamento interlaminar a qual foi calculada através da equação 6.28 sugerida por Whitney et al. (1978).

$$\tau_i = \frac{h}{2L} \sigma_f \quad (6.28)$$

onde,

h = espessura

L = vão livre

σ_f = módulo de ruptura

A tensão de cisalhamento interlaminar, de $3,47 \pm 0,52$ MPa, pode estar diminuindo a capacidade do compósito de suportar cargas de flexão.

6.8.1.1. Impacto balístico

O balanço de energia, quando do impacto do projétil no corpo-de-prova pode ser calculado através da equação 6.29. Deve ser notado que a energia absorvida não pode ser atribuída totalmente ao material, visto que uma parte desta energia é perdida devido à deformação do projétil (Wall, 2002).

$$\frac{1}{2} m_{(inicial)} v_{(impacto)}^2 = \frac{1}{2} m_{(final)} v_{(residual)}^2 + E_{(absorvida)} \quad (6.29)$$

A energia específica calculada através da equação 6.30 permite que a resposta do material seja avaliada em comparação a outro material com densidades diferentes.

$$E_{spec} = \frac{E_{(absorvida)}}{DS_{(composito)}} \quad (6.30)$$

onde DS é a densidade superficial.

A tabela 6.34 mostra os resultados do ensaio de impacto balísticos. Utilizou-se duas faixas de velocidade para o impacto no compósito sanduíche bambu laminado colado-alumínio (BLCA). Pode ser visto através dos resultados da tabela 6.34 que o compósito não suportou este elevado nível de energia o qual atingiu 418,85 kJ/m² para a primeira faixa e 208,56 kJ/m² para a segunda os quais são bem superiores aos obtidos no ensaio de impacto do bambu laminado (42,54 kJ/m²)

Tabela 6.34 – Resultados do ensaio de impacto balístico para o BLCA.

Corpos-de-prova	Projétil	Velocidade (m/s)	Energia (J)	Energia (kJ/m ²)	Energia específica (J.m ² /kg)	Perfuração
1	9 mm (8,0 g)	346,92	481,41	416,44	0,26	sim
2	9 mm (8,0 g)	347,92	484,19	418,85	0,26	sim
3	9 mm (8,0 g)	245,51	241,1	208,56	0,13	sim
4	9 mm (8,0 g)	237,23	225,11	194,73	0,12	sim

Densidade do BLCA = 0,93 g/cm³ = 930 kg/m³

DS do BLCA = 1,82 g/cm² = 1820 kg/m²

Através das figuras 6.43 (a) e (b) pode-se notar o orifício feito pelo projétil na superfície de impacto do compósito (a) e na superfície oposta (b). Nota-se que há uma estabilidade global do material o qual preserva sua integridade estrutural sofrendo apenas uma perfuração e perda de material no ponto de impacto.



Figura 6.43 – BLCA após ser perfurado. (a) orifício de entrada e (b) saída do projétil.

A dureza do alumínio e do projétil foram determinadas através de ensaio de dureza Vickers a fim de se comparar a diferença entre a capacidade de sofrer deformação de ambos os materiais. Para a resistência ao impacto balístico é desejável que a superfície a ser impactada tenha dureza superior ao projétil, fato este que não acontece para o compósito estudado como pode ser constatado na tabela 6.35.

Tabela 6.35 – Resultados de micro dureza Vickers.

Material	Dureza Vickers
Alumínio	$87,60 \pm 5,05 \text{ HV } 0,1$
Projétil 9mm	$150,40 \pm 8,61 \text{ HV } 0,1$

Para uma futura análise seria interessante a utilização de um alumínio ou outro metal o qual tivesse dureza superior à do projétil com a finalidade de se tentar uma dissipação total da energia pelo material sem que este seja perfurado pelo projétil.

6.8.2. Análise microscópica

Pode-se verificar através da análise no MEV a diferença do aspecto de fratura nos ensaios de flexão e impacto. No primeiro nota-se claramente uma zona de compressão onde as fibras foram achatadas e outra região, tracionada, na qual as fibras foram fraturadas (figura 6.44 a). Já no ensaio de impacto (figura 6.44 b) não foi possível fazer esta distinção ao nível macroscópico.

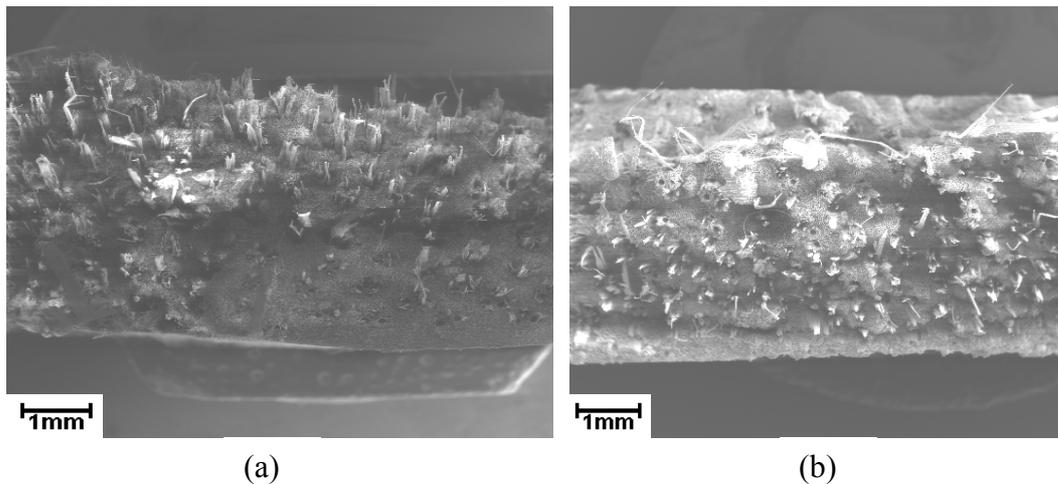


Figura 6.44 – (a) BL fraturado por ensaio de flexão e (b) por ensaio de impacto.

Nas Figuras 6.45 (a) e (b) pode se observar em maior detalhe a zona comprimida do ensaio de flexão notando-se algumas fibras fraturadas e outras achatadas.

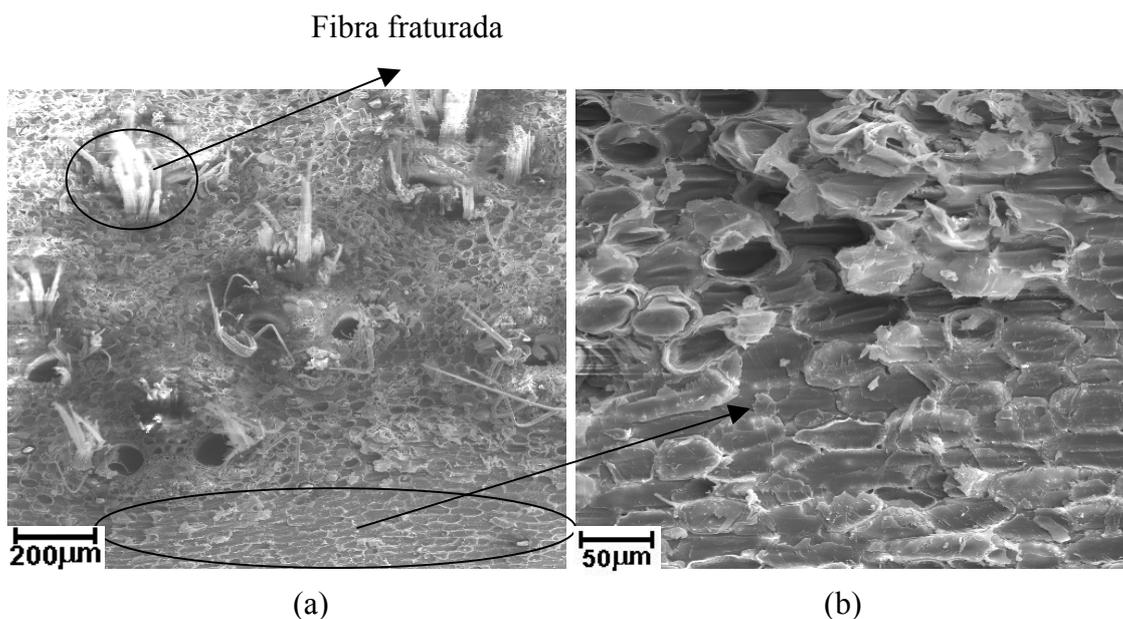


Figura 6.45 – (a) Zona comprimida no ensaio de flexão e (b) detalhe.

No ensaio de impacto o mesmo modo de falha, com fibras fraturadas, é apresentado, porém não existe uma área grande de fibras achatadas como nos corpos-de-prova submetidos à flexão, como pode ser visto nas figuras 6.46.

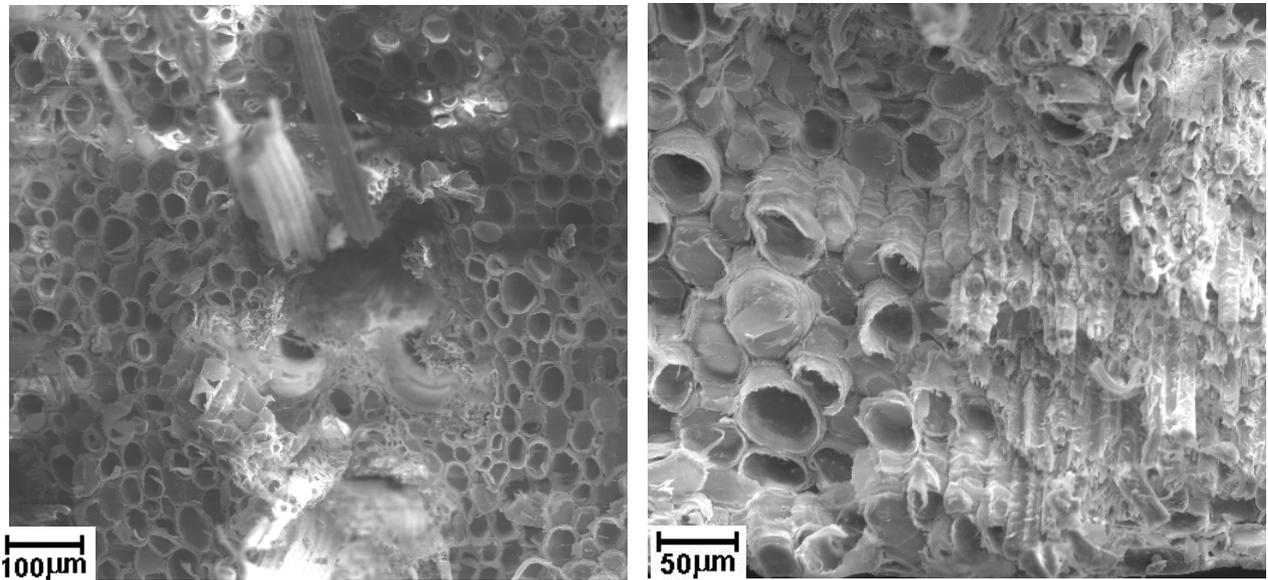


Figura 6.46 – BL fraturado por ensaio de impacto.

6.8.3. Propriedades térmicas

6.8.3.1. Análise termogravimétrica

Os gráficos de termogravimetria e termogravimetria diferencial estão apresentados nas figuras 6.47 (a) e (b).

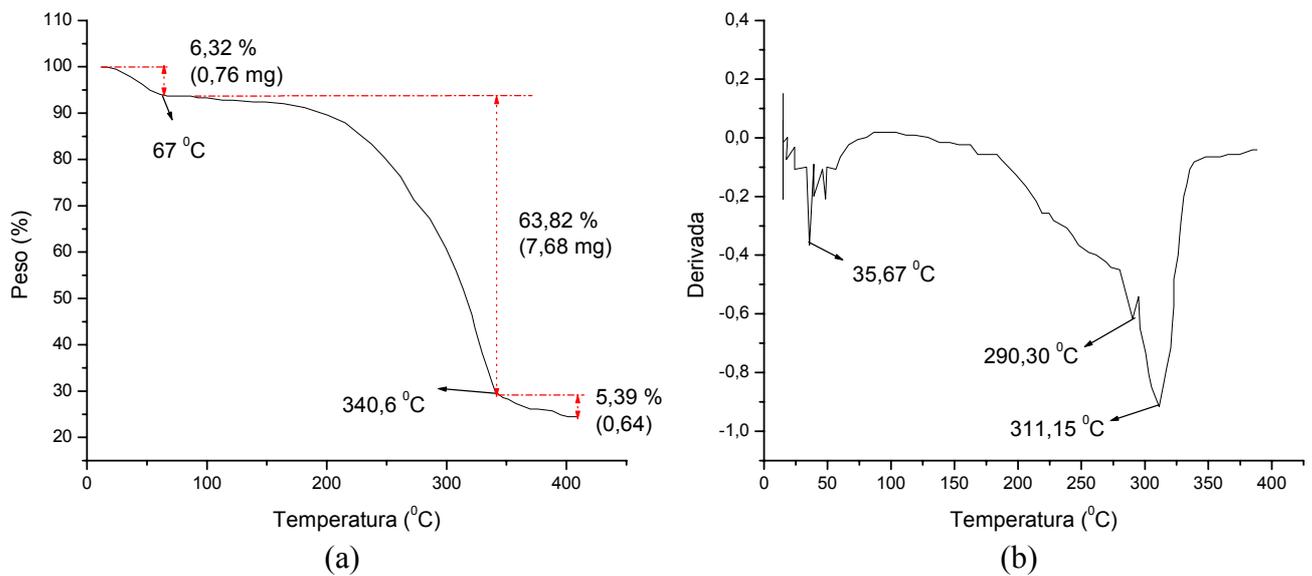


Figura 6.47 – (a) Termogravimetria e (b) termogravimetria diferencial do bambu em seu estado natural.

Até a temperatura de 67 °C há uma perda de água de 6,32 % como também notado para a polpa de bambu, sisal e eucalipto. A partir de 120 °C já pode ser observada uma degradação, bem vagarosa, da celulose, ao contrário da polpa de bambu que só começa a se degradar a partir de 166 °C e de forma mais acentuada. Esta perda se dá até a temperatura de 340 °C e corresponde a 63,82 % do material. Esta diferença de comportamento pode ser explicada pelo processo de polpação o qual elimina parte da lignina presente no bambu. Após a temperatura de 400 °C observa-se que ainda restam 24,47 % da amostra em comparação a 25 % restantes para a polpa de bambu.