

4.0

Apresentação e análise dos resultados

4.1

Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais

Geometria das fibras

Pode ser observado, na tabela 4.1, que as medidas do diâmetro da fibra de curauá, realizadas através do projetor de perfil e através do uso do paquímetro, resultaram em valores consideravelmente diferentes (com o paquímetro, obteve-se um valor médio cerca de 28% inferior àquele obtido com o projetor). Dos inconvenientes já descritos a respeito do método que utiliza o paquímetro, pode-se concluir que o valor determinado pelo processo óptico (projetor) corresponde a uma maior precisão, e isso pode ser notado pelo maior valor do coeficiente de variação das medidas realizadas com o paquímetro (42,35%) em relação às feitas com o projetor (29,25%). As medidas de diâmetro da fibra de juta, feitas através do método óptico, resultou em um valor medido inferior ao de fibra de curauá (cerca de 28%). Contudo, o processo do paquímetro é bem mais frequentemente adotado nos trabalhos de caracterização de fibras vegetais encontráveis na literatura técnica. Tomando-se os valores constantes da tabela 2.1 e comparando-se com os obtidos experimentalmente nesse trabalho, usando-se o mesmo método de medida (paquímetro), percebe-se que a fibra de curauá apresentou diâmetro (0,092 mm) inferior em 39% ao da fibra de sisal (0,15 mm), obtido por Ghavami et al (1999). Disso resulta que o reforço de curauá, para um mesmo comprimento de fibra inserido, teria uma relação de aspecto (comprimento/diâmetro) superior ao da fibra de sisal. Essa característica do reforço torna-se importante como um dos fatores determinantes da resistência do compósito a esforços de tração.

Tabela 4.1 – Diâmetro, teor de umidade e peso específico das fibras.

Tipo de fibra		Característica				
		Diâmetro (mm) (projeto de perfil)	Diâmetro (mm) (paquímetro)	Comprimento (mm)	Teor de umidade (%)	Peso específico (kN/m ³)
Curauá	Valor médio	0,127	0,092	1134,00	11,47	13,47
	Coef. de variação	29,25	42,35	16,99	3,20	2,93
Juta	Valor médio	0,091	-	705,00	11,37	10,79
	Coef. de variação	19,56	-	29,08	8,30	5,44

De modo geral, o peso específico das fibras de curauá revelou-se superior aos obtidos para algumas das fibras mais comumente utilizadas em compósitos, constantes da Tabela 2.1. Esse fato pode ser considerado como indicio de uma maior resistência mecânica à tração da fibra, pela ocupação mais efetiva do seu volume por material sólido. Em relação às fibras de juta, ensaiadas nesse trabalho experimental, as fibras de curauá mostraram-se 25% mais densas.

Em relação à umidade natural, apresentada pelas fibras de curauá e juta ensaiadas, pode-se observar que ambas apresentaram valores muito próximos, revelando comportamento semelhante em termos de capacidade de absorção de umidade do entorno, dentro dos intervalos de umidade ambiental presentes no laboratório. A Tabela 4.2 apresenta dados obtidos dos ensaios de absorção de água das fibras de curauá e juta. A Figura 4.1 mostra esses resultados em conjunto com aqueles obtidos por Ghavami e Tolêdo Filho (1992) para fibras de sisal e coco.

Tabela 4.2 – Absorção de água das fibras no tempo.

Tempo (horas)	24	48	72	96	120	144	192	240	288	
Absorção de água (%)	Curauá	345,72	407,34	425,80	428,70	436,98	440,20	449,00	449,00	449,00
	Juta	222,86	253,67	262,90	273,90	274,21	274,32	274,69	274,70	274,70

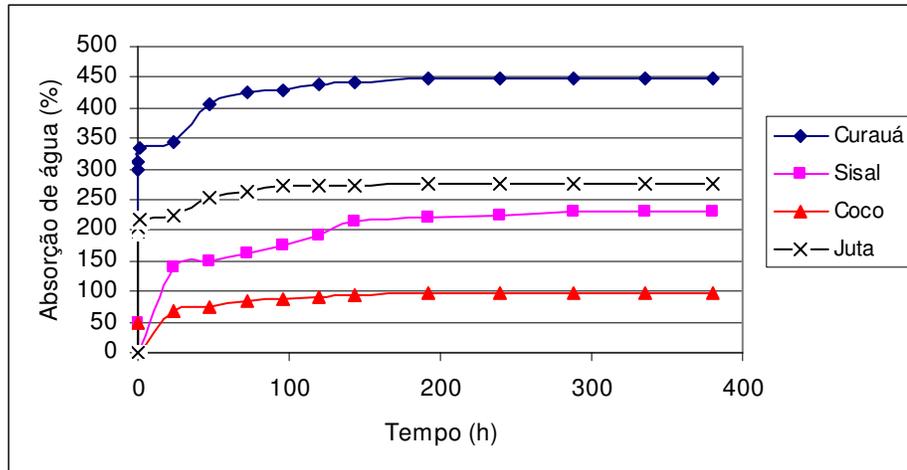


Figura 4.1 - Absorção de água das fibras vegetais.

Pode-se notar que foi significativamente maior a capacidade de absorção de água da fibra de curauá, em comparação com as demais fibras vegetais. A primeira chega a absorver 94,37%, 63,45% e 358,16% de água a mais que as fibras de sisal, juta e coco, respectivamente, após 288 horas de imersão. A fibra de curauá absorveu 350% do seu peso seco em água após 24 horas de imersão, atingido a saturação com aproximadamente 450%, de absorção.

Na produção de compósitos cimentícios, uma fibra que apresente alta absorção, a exemplo do que foi observado para as fibras de curauá, traria inconvenientes que poderiam comprometer o desempenho dos elementos moldados. O primeiro deles seria a diminuição da trabalhabilidade da mistura fresca, uma vez que a água adicionada seria, em boa parte, absorvida pelas fibras, podendo trazer dificuldades nas operações de mistura, lançamento e adensamento. Isso poderia causar a necessidade de maior quantidade de água para garantir uma certa trabalhabilidade. Se isso ocorrer, esse excesso de água, ao ser perdido por difusão e secagem, poderia resultar em maior porosidade do material compósito, em detrimento da resistência mecânica.

O segundo problema seria o fato de que, ao absorvem a água da mistura fresca, as fibras vegetais sofrem considerável expansão transversal (Ghavami e Tolêdo Filho 1992) e, ao secarem, essas fibras sofrem retração

volumétrica no interior da matriz, o que pode causar descolamento entre as duas fases, fibra e matriz. Desse modo, a aderência do reforço à matriz pode tornar-se precária, levando ao rebaixamento dos índices de resistência mecânica do compósito.

A Figura 4.2 mostra um detalhe da evolução da absorção de água para as fibras de curauá e juta até a primeira hora de imersão. Nos 5 minutos de imersão, as fibras de curauá alcançaram uma absorção de água de 298,84%, que corresponde à cerca de 66,5% da absorção total, no ponto de saturação. Pode-se observar que, após a primeira hora de imersão, as fibras atingiram uma absorção de água de cerca de 97% da absorção que apresentam após 24 horas de imersão. Em relação ao estado completo de saturação, essa absorção de água na primeira hora já corresponde a uma parcela de consideráveis 74,4%. Isso significa que pode ser grande o comprometimento da trabalhabilidade da mistura, pela imersão das fibras absorventes, já que essas atingem quase que a totalidade de sua grande capacidade de reter a água, justamente no período necessário ao manuseio da mistura fresca.

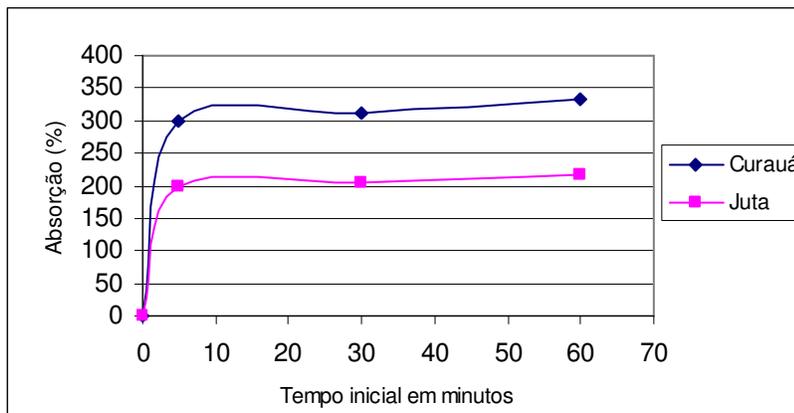


Figura 4.2 – Absorção de água da fibra de curauá e juta até a primeira hora.

Resistência à tração das fibras

Os ensaios de resistência à tração nas fibras de curauá mostraram valores dessa propriedade muito variáveis, tendo a média se situado em 492,62 MPa. Esse valor é superior aos encontrados por Ghavami (1985) para as fibras de coco (entre 150,00 e 198,00 MPa) e também superior à média encontrada, nesse trabalho, para as fibras de juta (299,92 MPa).

A Figura 4.3 apresenta o diagrama tensão-deformação sob tração de um exemplar da fibra de curauá (os diagramas tensão-deformação de todos os corpos-de-prova estão no Anexo A). O valor máximo alcançado, em toda a amostra, foi de 832,50 MPa, estando bastante acima da média calculada. A Tabela 4.3 apresenta valores das propriedades mecânicas das fibras de curauá e juta estudadas nesse trabalho. A grande variabilidade desses valores medidos pode ser considerada como reflexo de algumas características, também bastante variáveis, já detectadas para essas fibras, como é o caso do diâmetro (largura) da seção transversal. Comparando-se o valor médio da resistência à tração da fibra de curauá (492,62 MPa) com a resistência da fibra de amianto (*chrysotile asbestos*), fornecida por Spence e Cook (1983), de 3100 MPa, percebe-se a superioridade da fibra mineral, no que tange à capacidade de reforço de compósitos, estando a resistência à tração da fibra de curauá num patamar de cerca de 16% desse valor.

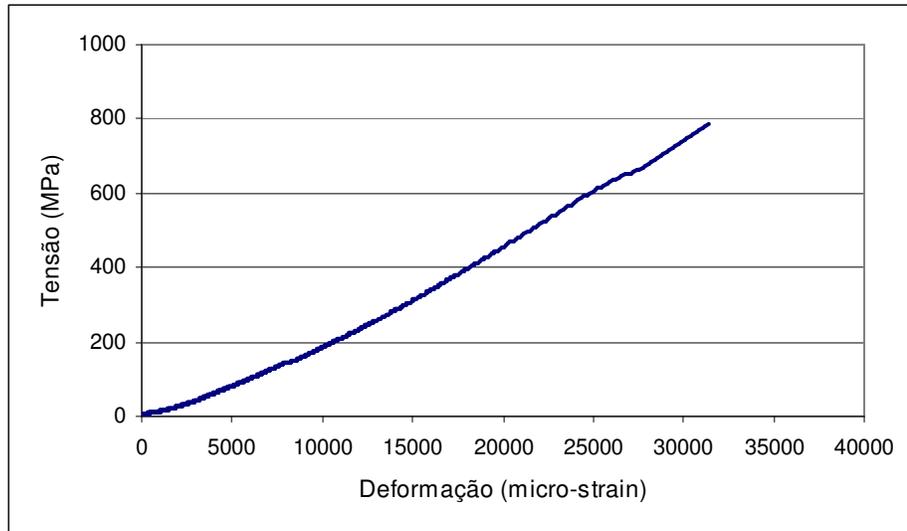


Figura 4.3 – Diagrama tensão-deformação da fibra de curauá.

Tabela 4.3 – Propriedades mecânicas das fibras de curauá e juta

Propriedade	Tipo de fibra					
	Curauá			Juta		
	Média	Valor máximo	Valor mínimo	Média	Valor máximo	Valor mínimo
Resistência à tração (MPa)	492,62	832,50	195,00	299,92	533,24	137,78
Módulo de elasticidade (GPa)	11,54	12,45	1021	-	-	-
Deformação na ruptura (%)	3,02	3,81	2,52	-	-	-

4.2

Propriedades mecânicas do compósito

4.2.1

Resistência à compressão

A tabela 4.4 apresenta resultados dos ensaios à compressão. Através dos valores obtidos experimentalmente de carga e deformação, foram traçados os gráficos tensão-deformação, possibilitando a obtenção da relação constitutiva à compressão dos compósitos com fibras de curauá, juta e sisal, bem como da mistura de referência. Os gráficos dos ensaios de cada corpo-de-prova estão apresentados no Anexo B.

Tabela 4.4 – Propriedades mecânicas dos ensaios à compressão.

Material	$\sigma_{\text{máx.}}$ (MPa) - CV(%)	E (GPa) - CV(%)	Coef. Poisson - CV(%)
CPN00-0%*	52,61 - 9,34	35,64 - 21,58	0,30 - 12,74
CPN00-0%	23,84 - 25,90	38,51 - 25,91	0,22 - 17,78
CPC25-2%	11,77 - 18,99	24,17 - 28,86	0,48 - 56,72
CPC15-3%	10,64 - 3,02	19,11 - 65,54	0,16 - 1,34
CPC25-3%	22,04 - 4,86	26,19 - 28,92	0,25 - 35,60
CPC45-3%	16,83 - 23,48	22,57 - 34,49	0,22 - 35,91
CPJ25-3%	18,15 - 13,52	18,24 - 31,29	0,19 - 53,24
CPS25-3%	18,26 - 15,01	29,33 - 31,87	0,28 - 15,33

A figura 4.4 mostra curva tensão-deformação dos compósitos com fibras de curauá, com variados comprimentos de fibra e fração volumétrica, juntamente com a curva da mistura de referência. Percebe-se o ganho considerável de capacidade de deformação da argamassa com a inserção da fibra vegetal como reforço. Embora seja mostrada a redução da resistência à compressão máxima, com o acréscimo do teor de fibra, o ganho de desempenho, em termos de ductilidade e capacidade de resistência após a fissuração da matriz, torna os compósitos com essas fibras vegetais vantajosos, em relação à matriz sem reforço, em aplicações nas quais sejam visadas uma maior tenacidade e uma maior resistência ao impacto. O compósito com fibras de curauá, de comprimento igual a 25 mm e fração volumétrica de 3%, foi o que apresentou melhor resistência média, chegando a cerca de 90% da resistência à compressão da matriz sem reforço, de igual relação água/cimento (0,59).

Houve sensível diminuição do módulo de elasticidade da matriz (38,51 GPa) com a inserção das fibras de curauá. Para o compósito de maior resistência (CPC25-3%), o módulo de elasticidade (26,19 GPa) foi 32% inferior ao da matriz.

Comparando-se os compósitos com fibras de curauá com compósitos reforçados com outros tipos de fibras vegetais (Figuras 4.5), pode ser observado que a resistência à compressão dos primeiros foi superior, em aproximadamente de 22%, à resistência dos compósitos com fibras de sisal e juta, de mesma matriz, comprimento de fibra (25mm) e fração volumétrica

(3%). Esses valores de resistência à compressão de compósitos com fibras de sisal e juta, usadas nessa comparação, foram obtidos em ensaios executados no programa experimental desse estudo.

Com relação aos compósitos produzidos e ensaiados em trabalhos anteriores, Rodrigues (1999) obteve, para compósitos com argamassa (traço em massa 1:1 e relação água/cimento 0,45) e fibras de sisal ($l=25\text{mm}$ e $V_f=2,21\%$), uma resistência à compressão média de 23,37 MPa. Nesse estudo, o compósito, com argamassa (traço em massa 1:1 e relação água/cimento de 0,59) e fibras de sisal ($l=25\text{mm}$, $V_f=3\%$) apresentou resistência à compressão média de 18,26 MPa, valor esse inferior ao de Rodrigues (1999), certamente, devido ao maior fator água/cimento do segundo. Contudo, mesmo com fator água/cimento de 0,59, os compósitos com fibras de curauá, de mesmo comprimento e fração volumétrica, apresentaram resistência à compressão média de 22,04 MPa, valor esse muito próximo ao obtido por Rodrigues (1999).

Petrucci (1978) forneceu um valor característico de 73,5 MPa para resistência à compressão do cimento-amianto. Os valores obtidos, dessa propriedade, para compósitos de argamassa e fibra vegetal ficam muito aquém daquele do cimento-amianto.

A Figura 4.6 mostra a relação tensão-deformação (longitudinal, transversal e volumétrica) do CPC25-3% (que apresentou melhor resultado entre compósitos) e a Figura 4.7 mostra corpos-de-prova rompidos à compressão.

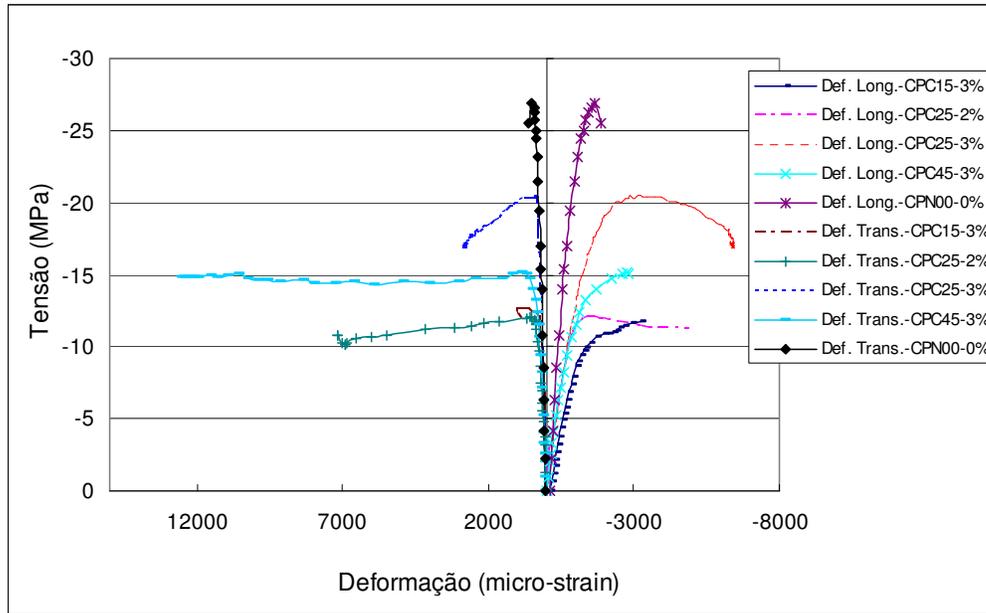


Figura 4.4 – Tensão-deformação na compressão de compósitos com fibra de curauá.

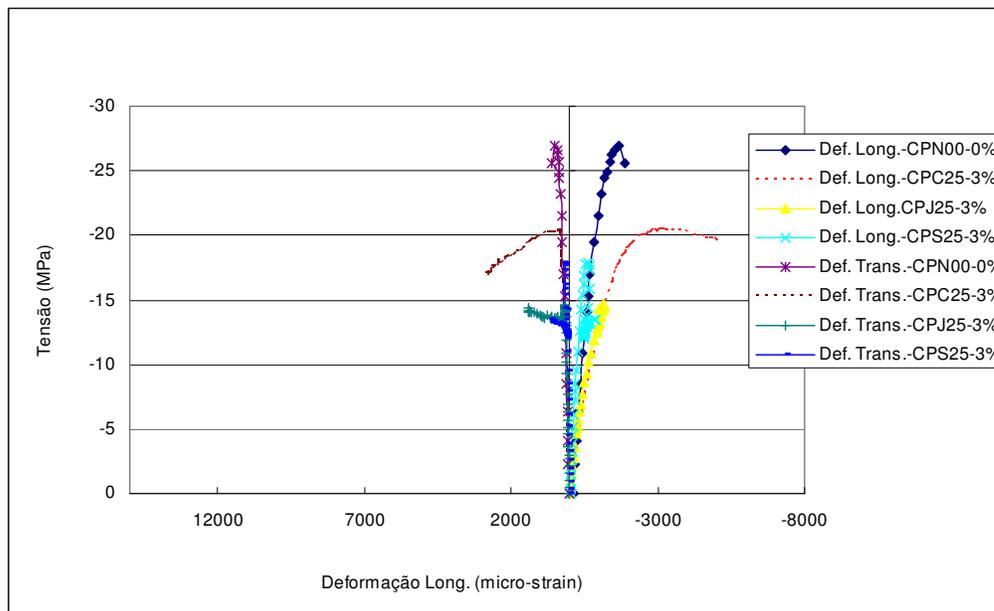


Figura 4.5 – Tensão-deformação na compressão de compósitos com fibras variadas.

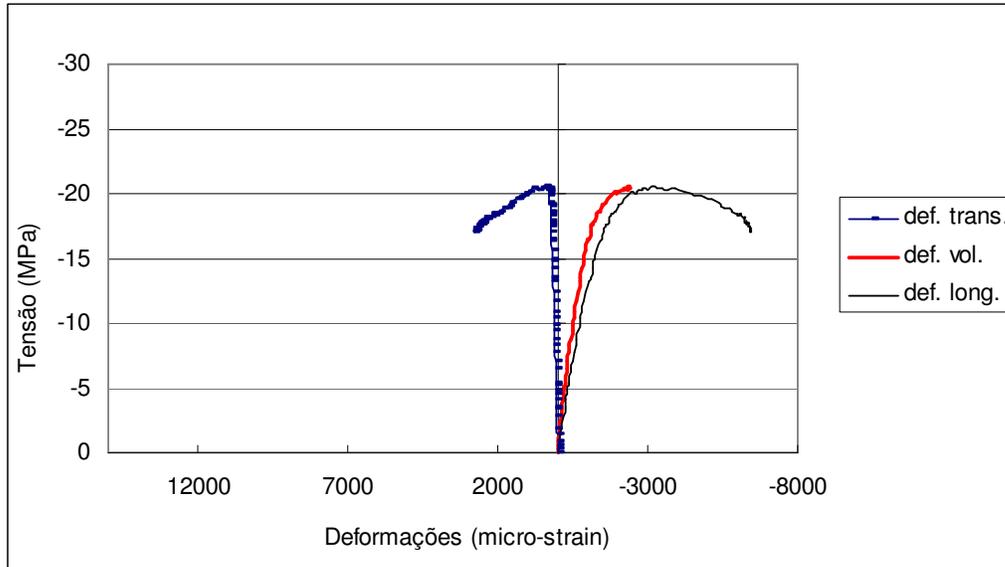


Figura 4.6 – Relação tensão-deformação na compressão para a mistura CPC25-3%.



Figura 4.7 – Corpos-de-prova rompidos após ensaios de compressão.

4.2.2

Resistência à tração por compressão diametral

Obtidas as cargas de ruptura sob tração indireta (por compressão diametral), foram calculadas as resistências médias à tração dos materiais ensaiados, que se encontram mostradas na figura 4.8.

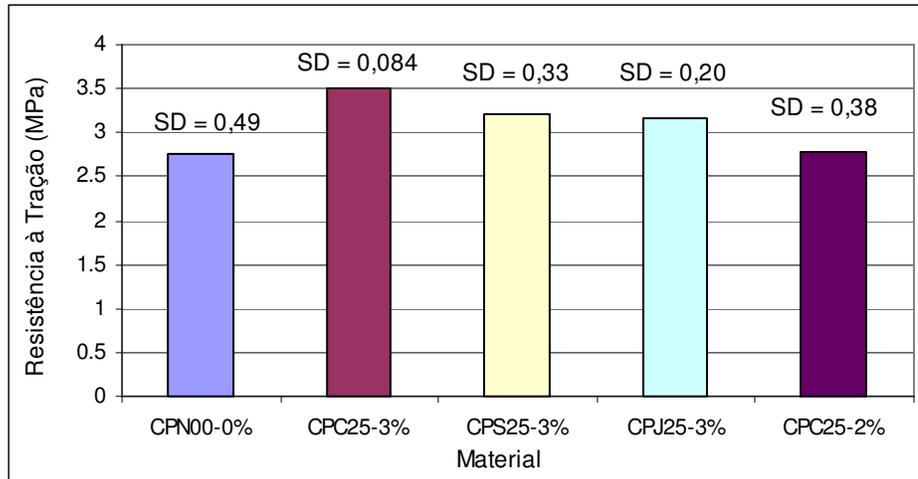


Figura 4.8 – Resistência à tração por compressão diametral.

Observou-se que os compósitos com fibras tiveram melhor desempenho sob tração que a mistura de referência (CPN00-0%). Sob esse tipo de esforço, as fibras podem efetivamente contribuir para melhoria da capacidade resistente do compósito, melhoria essa que depende do comprimento, orientação, fração volumétrica, relação de aspecto e resistência à tração, entre outros fatores inerentes à fibra.

Comparando-se os compósitos com tipos e frações volumétricas de fibras diferentes, o que apresentou melhor resultado foi o CPC25-3%, sendo sua resistência à tração superior à da matriz sem reforço em cerca de 27%. Comparado ao compósito de mesma fibra, porém com fração volumétrica menor (2%), o CPC25-3% apresentou superioridade semelhante, cerca de 26%. Em relação aos compósitos de juta e sisal, com mesma matriz, comprimento de fibra (25mm) e fração volumétrica (3%), o CPC25-3% foi superior em 11% e 9%, respectivamente.

Repetindo o desempenho já obtido sob compressão, também sob tração as fibras de curauá mostraram-se mais eficientes como reforço da matriz, para mesmos comprimentos e fração volumétrica, comparadas às de sisal e juta.

A Figura 4.9 apresenta corpos-de-prova de compósitos e da mistura de referência, rompidos após os ensaios de tração por compressão diametral. Pode-se notar o grau diferenciado de deformação dos compósitos

ao romper-se, que é, visualmente maior nos compósitos que nos corpos-de-prova de argamassa sem reforço.

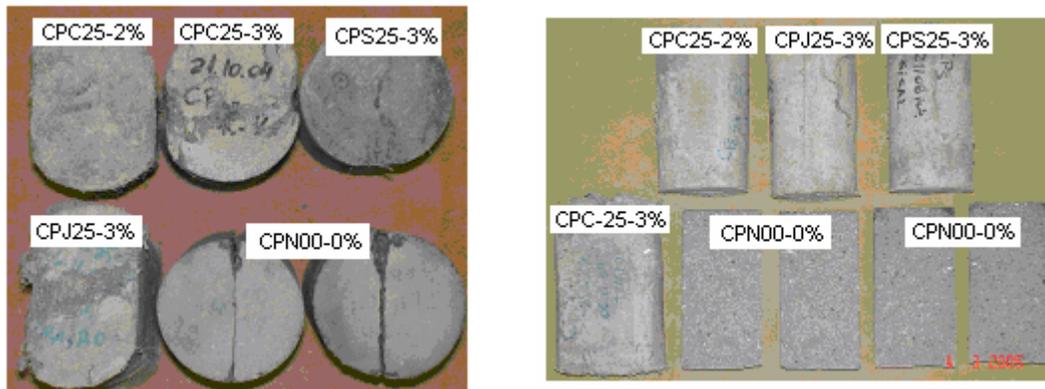


Figura 4.9 – Corpos-de-prova rompidos após ensaios de tração por compressão diametral.

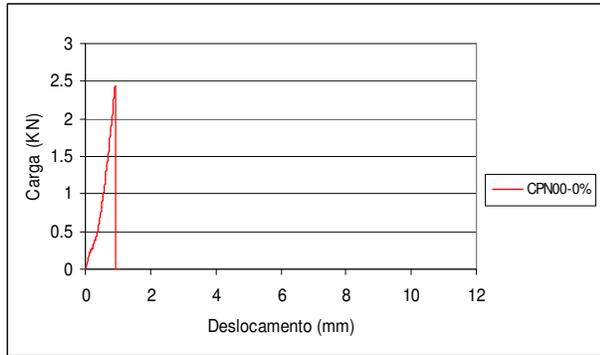
4.2.3

Resistência à Flexão

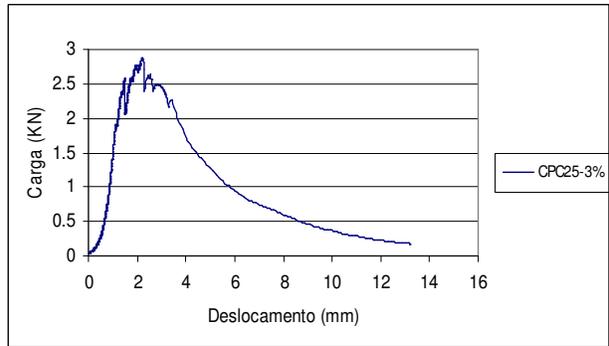
A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos ensaios à flexão em 4 pontos, onde constam os valores médios de carga máxima, carga, tensão e deslocamento no limite de proporcionalidade, além do módulo de elasticidade à flexão para cada material estudado. As Figuras 4.10 a 4.12 mostram exemplos de curvas carga-deslocamento para cada mistura (as curvas carga-deslocamento de todos os corpos-de-prova estão mostrados no Anexo C).

Tabela 4.5 – Propriedades mecânicas dos ensaios à flexão.

Material	$P_{\text{máx.}}$ (N)	$\delta_{\text{LOP.}}$ (mm)	$P_{\text{LOP.}}$ (N)	σ_{LOP} (MPa)	E (GPa)
CPN00-0%	2092,50	0,69	2092,50	4,52	2,12
CPC25-2%	1965,89	0,94	1470,00	3,18	1,46
CPC25-3%	2424,22	0,93	1830,00	3,95	1,37
CPC45-2%	2212,84	0,62	1855,00	4,01	2,07
CPC45-3%	1686,00	0,65	1387,00	3,00	1,48

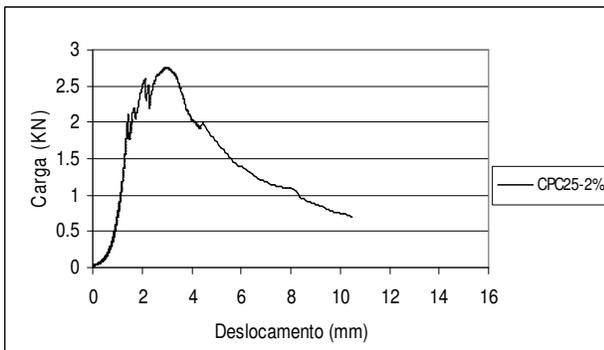


(a)

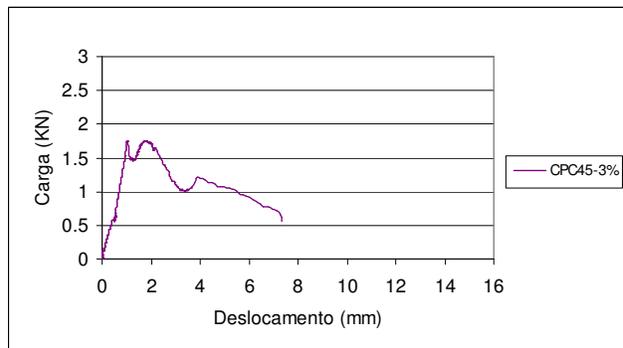


(b)

Figura 4.10 – Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. CPN00-0% (a) e CPC25-3% (b).

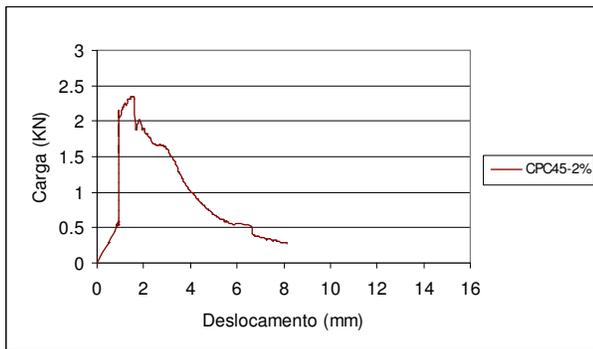


(a)

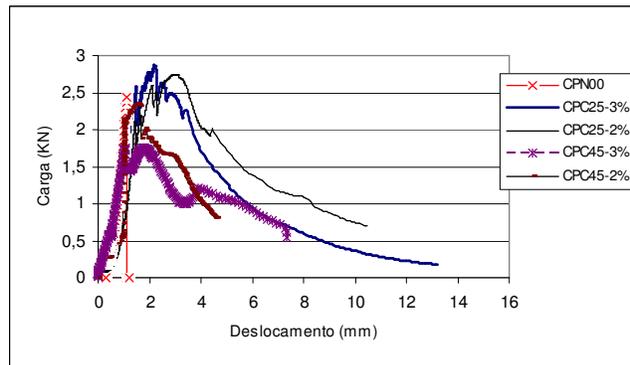


(b)

Figura 4.11 – Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. CPC25-2% (a) e CPC45-3% (b).



(a)



(b)

Figura 4.12 – Curva carga-deslocamento sob flexão em 4 pontos. CPC45-2%(a) comparação entre misturas(b).

O valor medido da carga máxima aumentou em 16% para o compósito CPC25-3%, em relação à matriz sem reforço. Notou-se que a melhoria de desempenho do compósito foi muito dependente da fração volumétrica das

fibras, pois, para uma fração de 2% (CPC25-2%) não houve ganho da resistência máxima.

Os módulos de elasticidade foram calculados de acordo com a equação da linha elástica, (equação 3.6), utilizando os valores médios obtidos para a carga e o deslocamento no limite de proporcionalidade. A adição de fibras fez diminuir o módulo de elasticidade, sendo que, para o compósito de melhor desempenho em termos de resistência (CPC25-3%) houve decréscimo de 35% dessa propriedade, em relação à matriz sem reforço.

Do estudo de Rodrigues (1999), com corpos-de-prova de mesmo tamanho e geometria que os utilizados no presente trabalho, o valor da carga máxima sob flexão para o compósito com fibras de sisal ($l=25\text{mm}$ e $V_f=2,21\%$) foi de 2.920,16 N. Esse valor foi pouco superior (cerca de 20%) ao obtido, nesse trabalho, para compósitos com fibras de curauá ($l=25\text{mm}$ e $V_f=3\%$), embora o fator água/cimento usado por Rodrigues fosse igual a 0,45, enquanto que o do compósito com curauá foi de 0,59. Deve ser registrado que o compósito com maior comprimento e maior fração volumétrica (CPC45-3%) mostrou grande dificuldade na moldagem, o que influenciou em sua homogeneidade, tornando temerária a comparação com os demais compósitos produzidos.

Foi marcante o papel das fibras adicionadas no desempenho do material sob flexão, após a fissuração da matriz, pois, ao contrário da mistura de referência, os compósitos não sofrem ruptura brusca e ainda continuam a suportar carga até bem além do ponto de carga de pico, apresentando grande deformação. A Figura 4.13 apresenta um exemplo de corpo-de-prova a flexão sendo ensaiado.

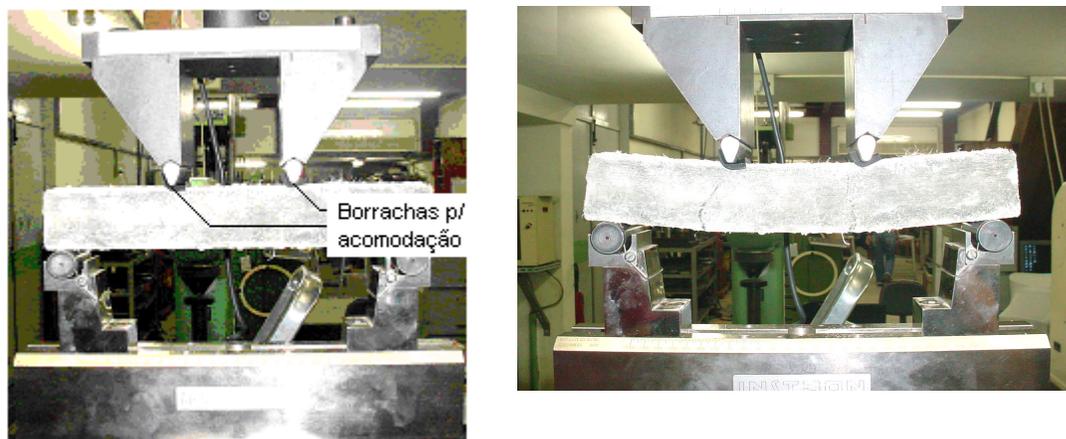


Figura 4.13 – Corpo-de-prova durante ensaio à flexão.

4.2.3.1

Análise da tenacidade

Para caracterizar a tenacidade foram calculados os índices I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} , propostos pela ASTM C1018 (1992), e os valores de FT e T_{JCL} , propostos pela norma japonesa JCI-JCSE-SF4 (1983). Os valores estão apresentados na Tabela 4.6. A Tabela 4.7 apresenta os índices adimensionais de resistência e o fator de tenacidade calculado de acordo com a norma belga NBN B15-238 (1992).

Tabela 4.6 – Índices de tenacidade dos compósitos sob flexão, segundo as Normas ASTM (1992) e JCI-JCSE-SF4 (1983).

Índices de Tenacidade (CV)						
Misturas	ASTM C1018 (1992)				JCSE - SF4 (1983)	
	I_5 . (%)	I_{10} . (%)	I_{20} . (%)	I_{30} . (%)	FT	T_{JCL}
					Mpa - (%)	KN.mm - (%)
1 CPC25-2%	3,09 - (21,07)	10,33 - (22,32)	11,85 - (25,86)	12,95 - (16,74)	4,89 - (23,75)	4,32 - (32,28)
2 CPC25-3%	7,21 - (20,76)	11,45 - (22,93)	14,06 - (21,84)	17,20 - (3,08)	7,62 - (24,14)	6,35 - (24,16)
3 CPC45-2%	1,76 - (5,62)	4,33 - (11,24)	6,13 - (28,38)	8,33 - (9,34)	1,15 - (73,79)	0,94 - (78,23)
4 CPC45-3%	1,27 - (10,17)	2,30 - (20,78)	4,60 - (35,75)	7,05 - (98,70)	3,07 - (48,22)	1,92 - (74,84)

Pode-se observar que os valores dos índices de tenacidade tiveram coeficientes de variação altos. Isto possivelmente ocorreu devido à influência de determinados fatores, como por exemplo, as dificuldades de moldagem

dos compósitos com fibras de maior comprimento (45 mm), levando a valores diferentes para um mesmo tipo de material.

Para os índices de tenacidade I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} os melhores resultados foram obtidos para os compósitos CPC25-2% e CPC25-3%, sendo melhor ainda para o segundo, enquanto que para os compósitos CPC45-2% e CPC45-3%, os mesmos tiveram resultados muito baixos em relação aos primeiros, onde pode-se observar que para o comprimento de 45 mm de fibra e maior fração volumétrica da mesma, foi obtido um valor menor para tenacidade, como mostra a Figura 4.14.

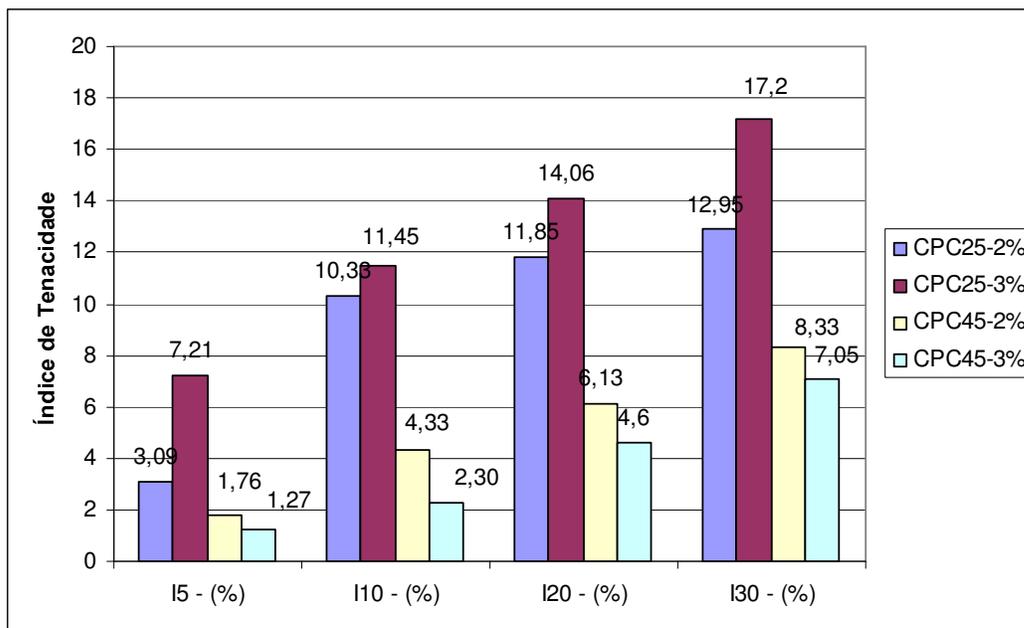


Figura 4.14 – Índices de tenacidade de ASTM C1018 para compósitos com fibras de curauá.

Para os índices propostos pela norma japonesa JCI-JCSE-SF4 (1983) FT e T_{JCI} , verifica-se o melhor resultado para o compósito com menor comprimento de fibra e maior fração volumétrica, que no caso foi o CPC25-3% conforme a Figura 4.15.

Pode-se verificar que com o aumento da deformação, o índice P_n^* sofreu redução para a maioria dos compósitos, exceto para o compósito

CPC45-2%, para o qual foi sempre crescente. O compósito que apresentou melhor resultado foi o CPC45-3%.

Tabela 4.7 – Índices de tenacidade definidos pela NBN B15-238 (1992).

Misturas	Índice de Resistência (CV) - (%)				Tenacidade na Flexão (CV) Mpa (%)			
	P* ₁₅₀	P* ₃₀₀	P* ₄₅₀	P* ₆₀₀	FT ₁₅₀	FT ₃₀₀	FT ₄₅₀	FT ₆₀₀
1 CPC25-2%	1,28 (32,44)	0,64 (56,14)	0,25 (130,57)	0,16 (141,93)	4,89 (32,28)	3,72 (53,49)	2,75 (85,26)	0,70 (20,20)
2 CPC25-3%	1,21 (13,45)	0,69 (22,29)	0,31 (47,29)	0,14 (61,74)	7,62 (24,14)	8,62 (24,09)	7,49 (30,72)	2,22 (35,54)
3 CPC45-2%	0,93 (31,93)	1,01 (21,41)	1,04 (0,75)	1,04 (1,02)	1,76 (50,40)	4,22 (69,64)	2,39 (67,52)	2,29 (67,50)
4 CPC45-3%	1,57 (13,85)	1,39 (14,90)	1,28 (4,24)	1,25 (1,70)	4,11 (62,04)	3,66 (70,59)	3,34 (68,41)	3,14 (70,48)

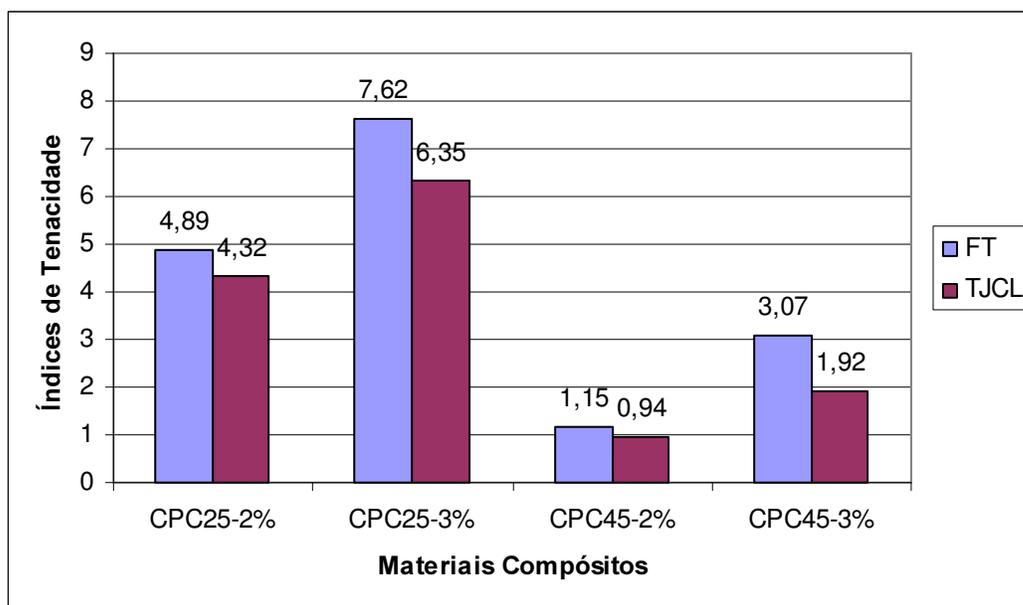


Figura 4.15 – Índices de tenacidade propostos pela norma japonesa JCI-JCSE-SF4 (1983).

A forma da curva carga-deflexão pode ser observada no índice adimensional de resistência P_n^* definido pela norma NBN B15-238 (1992) e calculado para as curvas experimentais, como mostram a tabela 4.7 e a Figura 4.16.

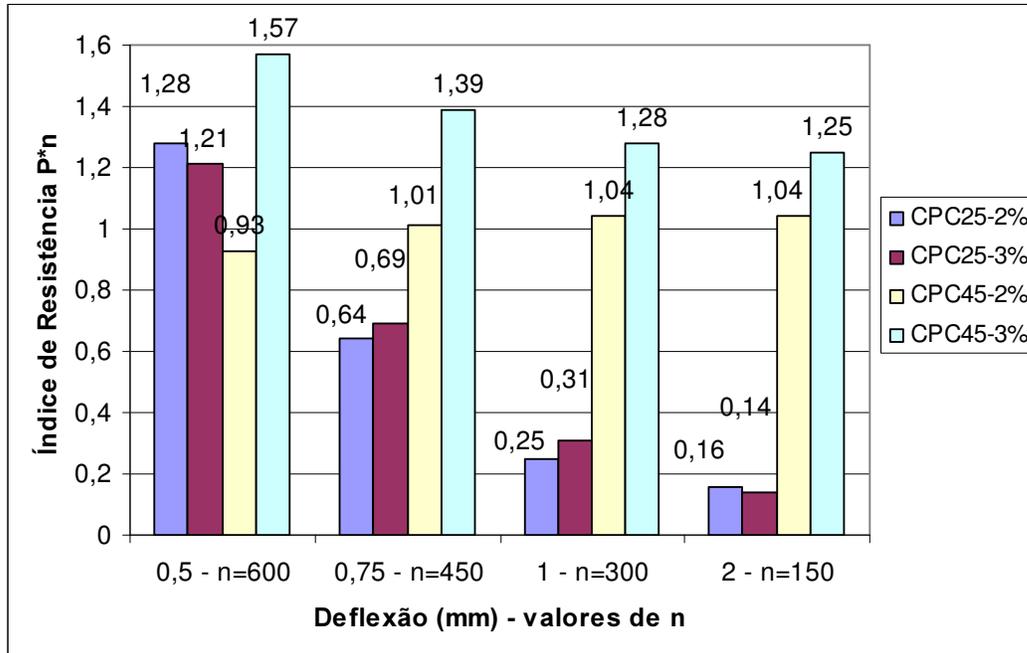


Figura 4.16 – Índice de resistência adimensional P^*n para compósitos reforçados com fibras curtas de curauá.

Foi calculado também o índice FT proposto pela norma NBN B15-238 (1992), que indica valor absoluto da área sob a curva e, dessa forma, incorpora em sua definição também o aumento da resistência causado pela fibra. Assim, de acordo com esse índice, se a fibra gera um incremento na capacidade de suportar carregamento, conseqüentemente apresentará maior tenacidade, conforme mostra a Figura 4.17.

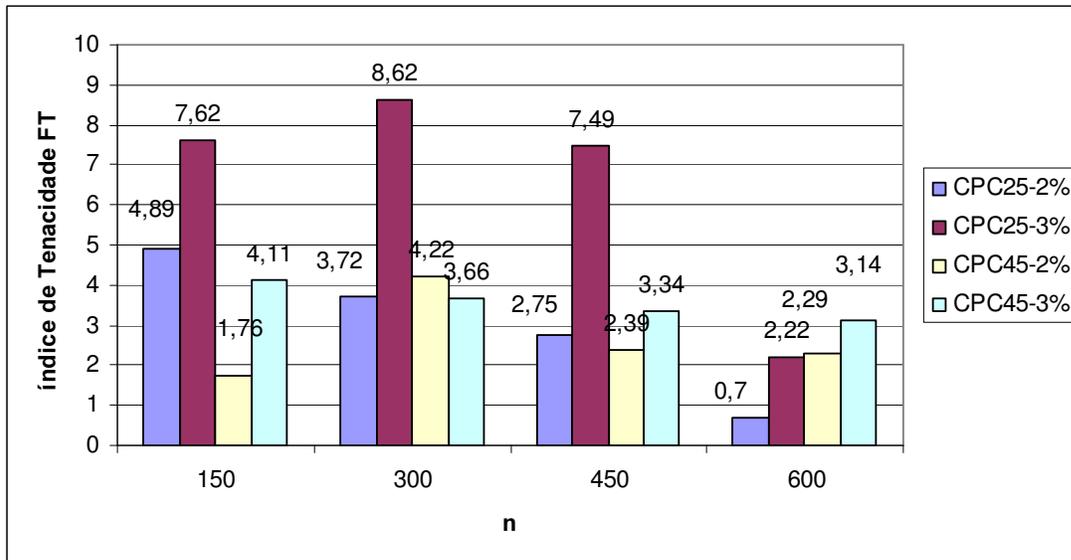


Figura 4.17 - Índice de Tenacidade FT, calculado de acordo com a NBN B15-238 (1992), para compósitos reforçados com fibras curtas de curauá.

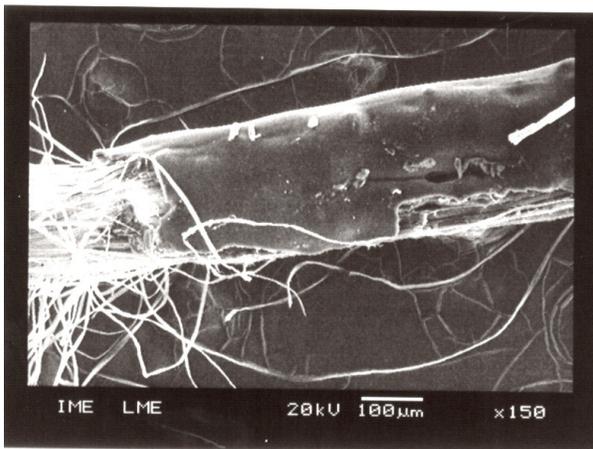
Pode-se observar que o compósito CPC25-3% apresenta a menor perda relativa de resistência, ou seja, maior amolecimento pós-fissuração, em comparação aos outros, e os compósitos que apresentaram os melhores resultados de tenacidade, são os que apresentam menor comprimento e maior fração volumétrica de fibra, CPC25-3% e CPC25-2%, pois os mesmos apresentaram maior capacidade de absorver energia.

Estudos anteriores têm demonstrado que a tenacidade, medida a deflexões muito baixas, é insensível ao volume de fibras. Além disso, é importante observar que os índices de tenacidade I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} são índices de proporcionalidade, e, portanto, são afetados também pela forma da curva carga-deflexão. Eles apresentam uma comparação entre energia absorvida durante o processo de carregamento e aquela necessária para iniciar a fissuração do corpo de prova. Por isso, o método da norma ASTM C1018 (1992) é difícil ser avaliado com precisão em comparação com os outros dois métodos.

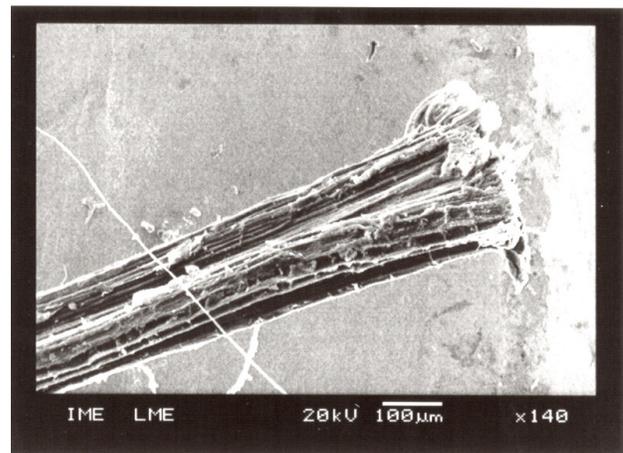
4.3

Análise da microestrutura das fibras de curauá e do compósito com fibras de curauá

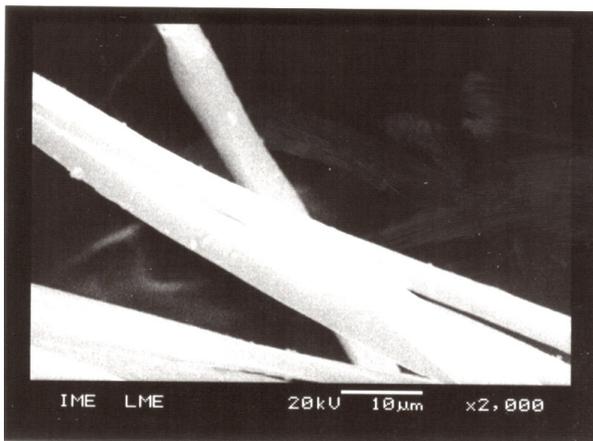
Amostras de fibras de curauá (após ensaios à tração em uma única fibra) e de compósitos (após ensaios à flexão), foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). A Figura 4.18 (a-d) apresenta micrografias da fibra de curauá.



(a) Fibra de curauá com ponta rompida



(b) Fibra de curauá com ponta cortada



(c) Microfibras de curauá



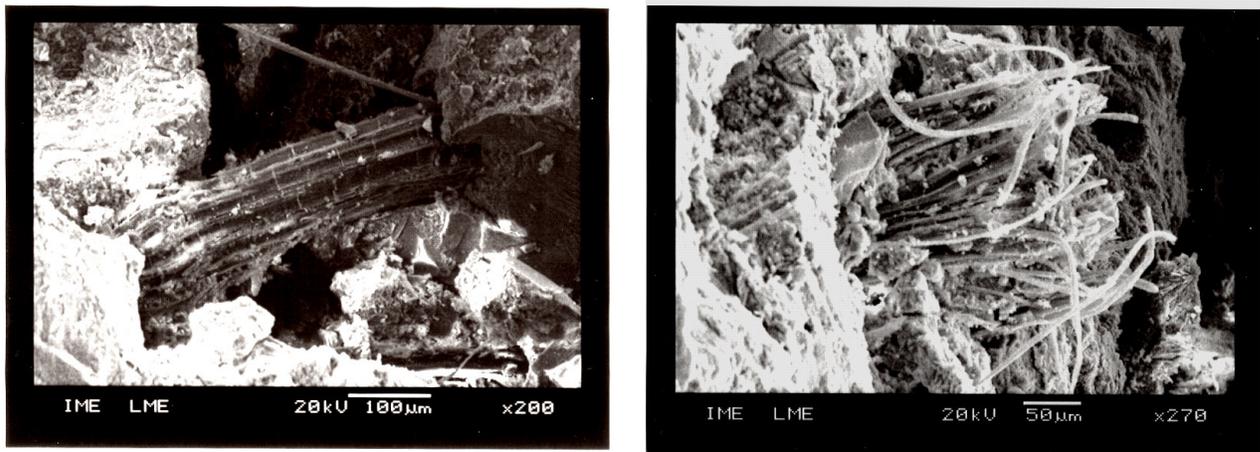
(d) Microfibrilha de curauá

Figura 4.18 a-d– Microscopia da fibra de Curauá após ensaio de tração em uma única fibra.

Observa-se uma estrutura envolvente (capa), em torno do feixe de micro-fibras que formam a macro-fibra (Figura 4.18-a), que não aparece na

extremidade oposta (Figura 4.18-b), podendo ter sido, nessa última, retirada pela garra da máquina durante a realização do ensaio de tração. Permanecendo essa espécie de capa em torno da fibra, enquanto a mesma estiver inserida na matriz, pode-se supor que traga rebaixamento da resistência de aderência entre fibra e matriz. Seu aspecto liso e polido parece pouco promotor do intrincamento necessário a uma boa aderência entre as duas fases, podendo causar diminuição da resistência à tração do compósito.

A Figura 4.19 (a-b) apresenta a microestrutura da superfície de fratura do compósito após ensaios de flexão.



(a) Ponte de trinca

(b) Ruptura da macrofibra e exposição das fibrilas

Figura 4.19 a-b – Microscopia no compósito com fibras de curauá após ensaio à flexão.

Observa-se que a estrutura envolvente da fibra (capa) não mais aparece, podendo ter ficado dentro da matriz após o arrancamento. Estudos posteriores deverão ser realizados para identificar essa estrutura envolvente da fibra de curauá e sua provável influência na resistência do compósito. Torna-se necessária a comprovação de sua permanência no compósito, após a moldagem dos corpos-de-prova, já que o atrito entre os materiais no processo de mistura ou reações químicas (compostos alcalinos da matriz cimentícia) poderiam eliminá-la.