

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados das propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de compressão, flexão e impacto. Aspectos microestruturais e fractográficos dos compósitos produzidos foram verificados através de imagens obtidas em MEV e na Lupa.

Os gráficos carga–deslocamento referentes aos ensaios de flexão à três pontos apresentados nesta seção já estão corrigidos quanto ao esmagamento do corpo de prova segundo descrito em 2.6.1.

Utilizou-se a seguinte nomenclatura para a indicação dos corpos de prova correspondentes as diferentes misturas cimento/polpa utilizadas na fabricação dos espécimes:

- ✓ Corpo de prova com 8% em massa de polpa refinada, **CP8R**;
- ✓ Corpo de prova com 8% em massa de polpa sem refino, **CP8SR**;
- ✓ Corpo de prova com 14% em massa de polpa refinada, **CP14R**;
- ✓ Corpo de prova com 14% em massa de polpa sem refino, **CP14SR**.

4.1. Ensaio de Compressão

De posse dos valores de carga e deformação obtidos experimentalmente são traçados os gráficos tensão-deformação que caracterizam o comportamento à compressão dos compósitos estudados. A forma das curvas tensão-deformação obtidas para a matriz reforçada com polpa (Figuras 4-1 a 4-4) é similar às curvas para argamassas reforçadas com 2% de fibras de sisal (25 mm em comprimento) determinadas por Rodrigues (1999).

É importante frisar que a deformação volumétrica constante destas figuras foi calculada a partir das deformações axial e lateral conforme a expressão 3-1.

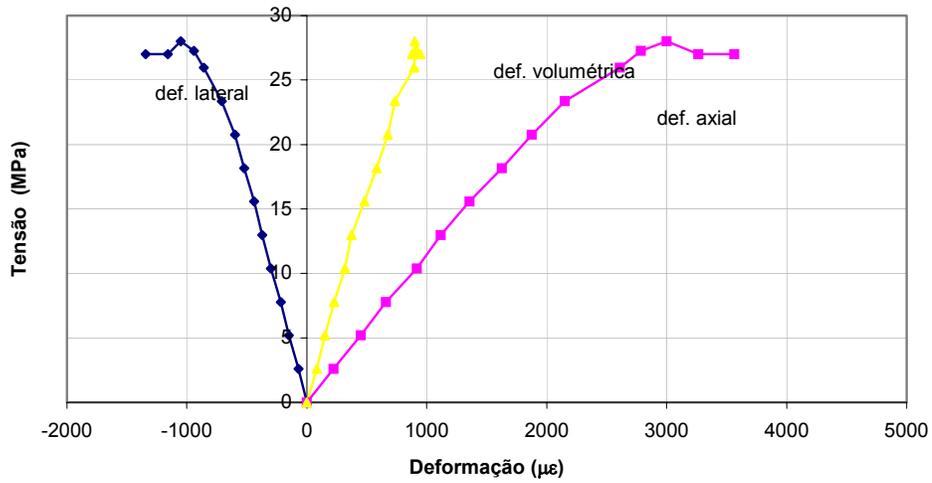


Figura 4-1 Variação da deformação com a tensão para o composto CP8R.

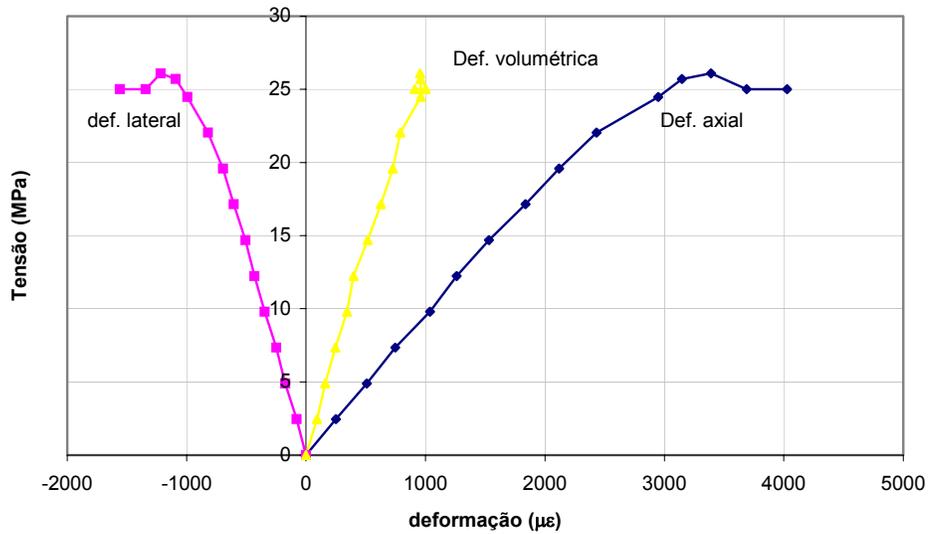


Figura 4-2 Variação da deformação com a tensão para o composto CP14R.

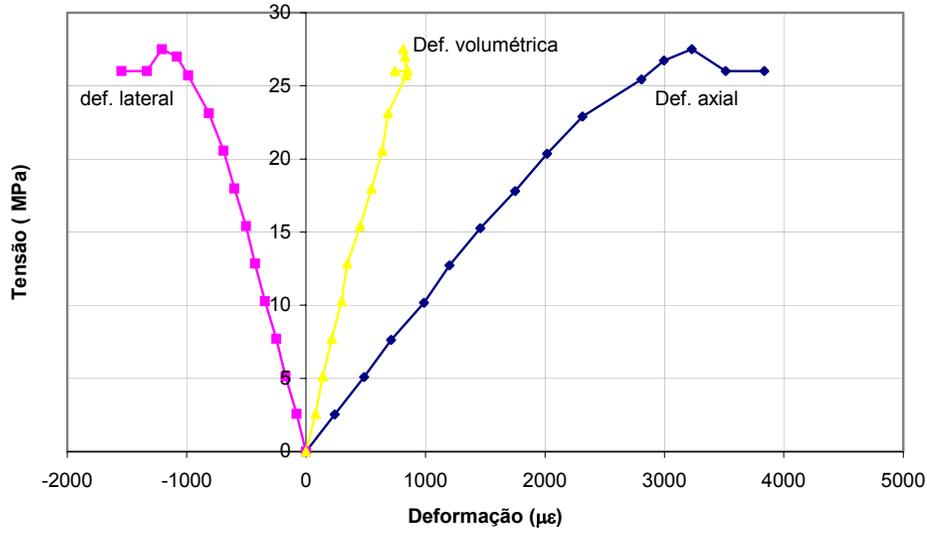


Figura 4-3 Variação da deformação com a tensão para o compósito CP8SR.

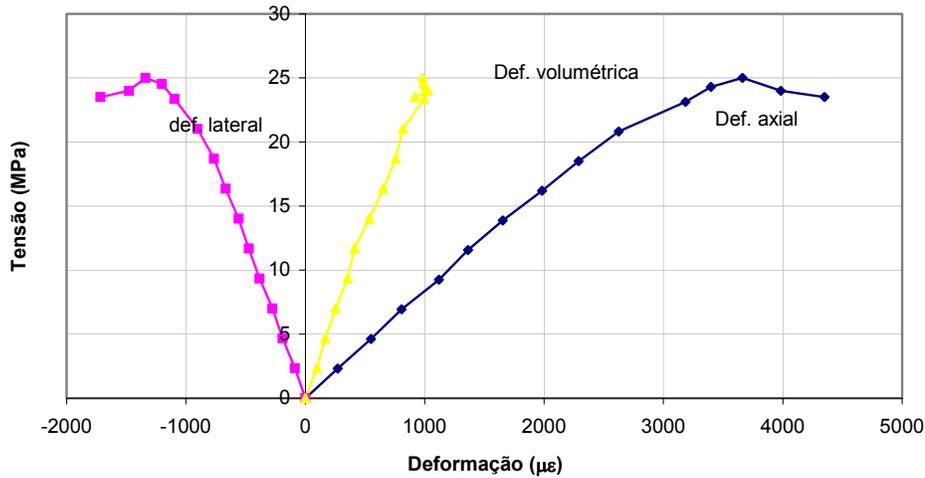


Figura 4-4 Variação da deformação com a tensão para o compósito CP14SR.

A Tabela 4-1 apresenta os resultados médios dos ensaios de compressão em termos de limite de resistência à compressão (σ_r^c), módulo de elasticidade (E_c) e o coeficiente de Poisson (ν) com seus respectivos coeficientes de variação (CV).

Tabela 4-1 Valores dos limites de resistência à compressão, módulo de elasticidade e razão de Poisson para os compósitos.

Mistura	σ_r^c - (MPa)	E_c - (GPa)	ν
CP8R	28,00 ± 1,12	24,55 ± 0,7	0,32 ± 0,01
CP14R	26,10 ± 1,05	21,00 ± 0,6	0,31 ± 0,01
CP8SR	27,56 ± 1,10	21,45 ± 0,8	0,31 ± 0,01
CP14SR	25,05 ± 1,00	18,50 ± 0,6	0,30 ± 0,01

Cabe acrescentar que os valores de E_c constantes na Tabela 4-1 foram calculados dividindo a tensão pela deformação correspondente para três pontos diferentes pertencentes ao regime linear elástico das curvas de carregamento. Um procedimento semelhante foi adotado para o cálculo da razão de Poisson dividindo a magnitude da deformação lateral pela magnitude da deformação axial. Quanto ao limite de resistência à compressão, este foi calculado normalizando a carga máxima pela seção resistente do corpo de prova.

Quanto aos valores do módulo de elasticidade listados, estes são similares aos obtidos com compósitos reforçados com fibras de sisal (Rodrigues, 1999).

Em trabalhos anteriores (Fujiyama, 1997) (Okafos, Eze-Uzomaka & Egbuniwe, 1996) e (Hughes, 1997), foi detectada uma queda no limite de resistência a compressão e no módulo de elasticidade devido a incorporação de fibras em diferentes matrizes. Se compararmos com o limite de resistência de argamassa 1:3 (32 MPa), pode-se concluir, conforme Tabela 4-1, que a adição da polpa de bambu exerce um efeito deletério sobre o comportamento em compressão dos compósitos. Tal efeito é atribuído a uma redução na área da seção resistente dos corpos de prova, uma vez que as fibras não sustentam cargas compressivas e ainda contribuem ao aumento da quantidade de vazios na matriz, em virtude de sua capacidade higroscópica.

O pequeno decréscimo na capacidade de carregamento do compósito que acompanha o aumento da quantidade de polpa parece estar de acordo com a colocação feita acima. No que se refere a comparação entre os compósitos de polpa refinada e não refinada, observa-se que o limite de resistência à compressão foi pouco afetado pelo tipo de polpa utilizada, conforme resultados listados na Tabela 4-1. Menciona-se no entanto que o processo de refino da polpa resulta na

retirada, quase que total, das hemiceluloses e pectinas, que são altamente higroscópicas, restando assim apenas as microfibrilas de celulose, o que deveria ser associado a uma melhora significativa na resistência à compressão.

Outro fato importante decorrente da adição de fibras pode ser notado através da observação dos espécimes depois de ensaiados. Devido ao efeito de ligação das fibras, ocorre o confinamento da matriz, não sendo observado nos espécimes de compósito a desagregação da matriz (Figura 4-5). Isto é, a presença das fibras garante um certo amortecimento sem que haja fratura catastrófica dos corpos de prova ensaiados. Embora sejam a níveis inferiores de carga máxima em relação à matriz plena.



Figura 4-5 Espécime ensaiado e detalhe da ligação matriz–fibra.

Em uma primeira aproximação o limite de resistência em compressão para o compósito pode ser estimado a partir de:

$$\sigma_r^c = V_m \sigma_r^m \quad (4-1)$$

onde os super-índices c e m se referem ao compósito e a matriz, respectivamente. A validade da equação acima mencionada é baseada na hipótese que as fibras não sustentam as tensões compressivas aplicadas.

4.2. Ensaio de Impacto

Procurando obter a quantidade de energia absorvida por unidade de área da seção dos corpos de prova fraturados, normalizou a energia total pela área da seção (4cm^2) obtendo assim os valores listados na Tabela 4-2. Pode-se observar que a energia de ruptura dos corpos de prova sofreu alteração com o tipo e quantidade de micro fibras incorporadas na matriz. Mas especificamente, o compósito se torna mais tenaz com o aumento da quantidade de reforço. O tipo de polpa também acarreta variação na energia absorvida no impacto, sendo que as fibras sem refino, apresentam menor capacidade de absorção de energia em relação às fibras refinadas. Isto é, as fibras não tratadas apresentam maior tendência para a fratura quando carregadas. Conforme as curvas de carregamento obtidas no ensaio de flexão (Figura 4-7), a área sob a curva carga-deslocamento é decrescente na ordem CP14R, CP14SR, CP8R e CP8SR, o que coincide com o comportamento apresentado pelos valores de energia de impacto apresentados na Tabela 4-2.

Tabela 4-2 Resultados experimentais dos ensaios de impacto.

Mistura	Energia ao Impacto - (J/cm^2)
CP8R	$1,40 \pm 0,050$
CP14R	$2,01 \pm 0,055$
CP8SR	$1,20 \pm 0,045$
CP14SR	$1,85 \pm 0,056$

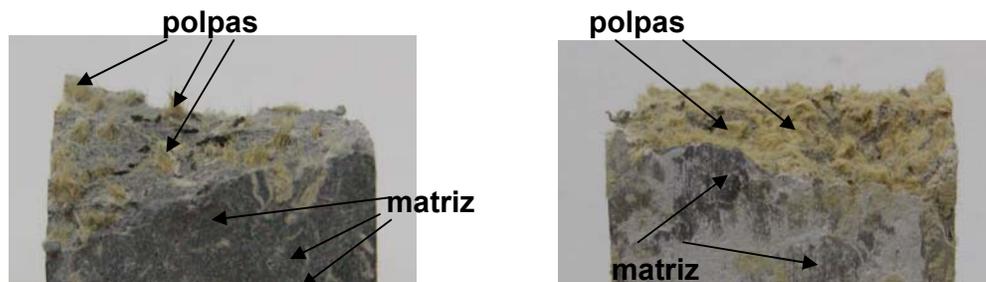


Figura 4-6 Superfície de fratura para os espécimes CP8SR e CP14SR respectivamente.

A Figura 4-6 mostra a superfície de fratura para os compósitos CP8SR e CP14SR após o ensaio de impacto, nota-se a presença de polpas em grumos salientes à superfície da matriz, que não é regular, o que dá indícios que o reforço foi fraturado. Em CP14SR nota-se a ausência superficial da matriz o que leva a acreditar que as fibras não foram dispersas adequadamente provavelmente devido a grande quantidade.

4.3. Ensaio de Flexão em três pontos

Diagramas carga-deslocamento do ponto de aplicação da carga foram registrados para o cimento reforçado com 8% e 14 % de polpa refinada e polpa sem refino respectivamente (Figura 4-7).

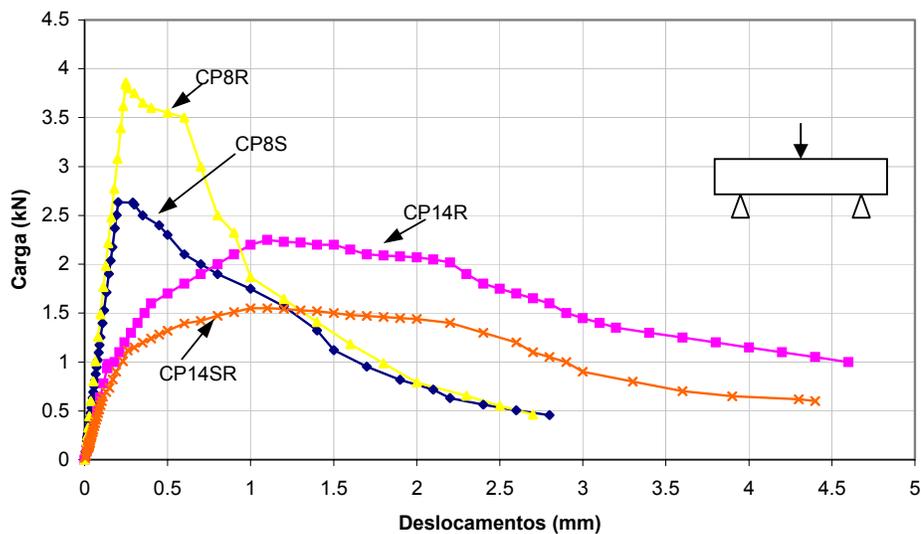


Figura 4-7 Carga-deslocamento para matriz cimentícia reforçada com polpa.

Pelas curvas apresentadas nesta figura, percebe-se que a quantidade e o tipo de polpa influenciam na capacidade de carregamento e na inclinação da reta representativa do regime linear elástico do compósito. Além disso, as fibras funcionam como ponte de transferência de tensões através das fissuras que

aparecem na matriz quando solicitada ao carregamento, proporcionando ao compósito maior capacidade de deformação e, por conseguinte, maior tenacidade.

Conforme explicada no item 2.5.4 a curva carga-deflexão pode ser dividida em duas partes: região I, que é a zona elástica antes da fissuração, e região II, que é a zona inelástica até a ruptura. Na Figura 4-7 não se consegue visualizar exatamente onde ocorre a primeira fissura do material, mas de esta deve ocorrer primeiramente para os corpos de prova com maior quantidade de polpa (CP14R e CP14SR) isto porque na região I considera-se que a carga aplicada é essencialmente suportada pela matriz.

Na região II as forças elásticas suportadas pela matriz são transmitidas para as fibras. Neste trabalho não se verificou um decréscimo na capacidade de carregamento associado ao início da fissuração que normalmente ocorre a níveis de cargas inferiores à carga máxima. De acordo com Kobayashi & Cho (1981), esta observação pode levar a conclusão que as fibras já vinham suportando uma quantidade de carga e após a fissuração esta só foi incrementada ou que a associação de vários fatores (comprimento e volume das fibras, velocidade de carregamento e resistência da matriz) possam ter permitido uma continuidade no suporte de carregamento. Ao final da curva o conjugado perde gradualmente sua capacidade de suporte de carga em razão do arrancamento ou ruptura das polpas e, finalmente, a ruptura do mesmo ocorre.

É oportuno comentar que os valores do módulo de elasticidade listados na Tabela 4-3 foram calculados a partir da equação da linha elástica (equação 3-5) e apresentam uma discrepância considerável quando comparados com os obtidos através dos ensaios de compressão. Esta discrepância, observada também por Rodrigues (1999), mostra que a determinação do módulo de elasticidade com a utilização de dados de carga e deslocamento do ponto de aplicação, mesmo com a aplicação da correção descrita no item 2.6.1 deve ser evitada quando possível. No que se refere aos valores da tensão máxima, o cálculo destes a partir da carga máxima foi baseado na equação 3-4 e portanto representam apenas uma estimativa aproximada da resistência à flexão.

A Tabela 4-3 mostra os valores do módulo de elasticidade, E_f , da carga máxima, $P_{m\acute{a}x}$, e da tensão máxima, $\sigma_{m\acute{a}x}$, para as misturas consideradas neste trabalho.

Tabela 4-3 Valores do módulo de elasticidade, carga máxima e tensão máxima obtidos a partir do ensaio de flexão.

Mistura	E_f - (GPa)	$P_{\text{máx}}$ - (kN)	$\sigma_{\text{máx}}$ - (MPa)
CP8R	$13,56 \pm 0,41$	$3,86 \pm 0,36$	$13,90 \pm 1,29$
CP14R	$6,01 \pm 0,19$	$2,25 \pm 0,23$	$8,10 \pm 0,83$
CP8SR	$11,38 \pm 0,35$	$2,63 \pm 0,28$	$9,47 \pm 1,01$
CP14SR	$5,19 \pm 0,17$	$1,55 \pm 0,17$	$5,58 \pm 0,61$

As Figuras 4-8, 4-9 e 4-10 apresentam os valores descritos na tabela 4-3 em forma gráfica.

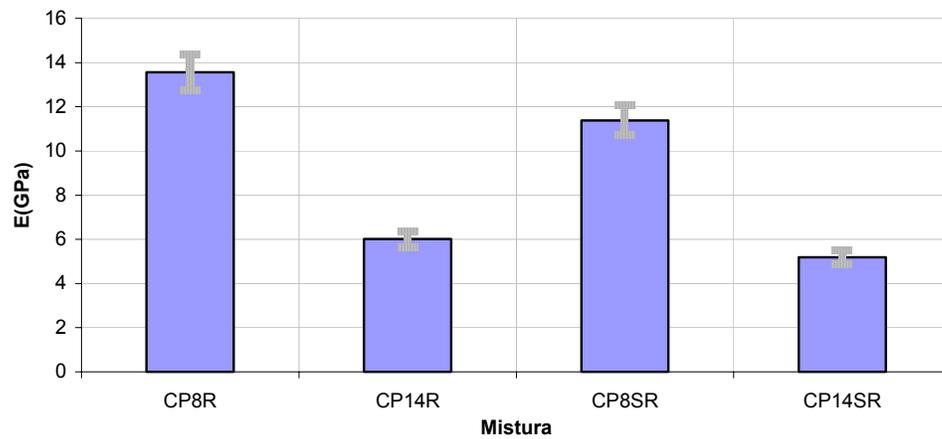


Figura 4-8 Valores do Módulo de Elasticidade com suas devidas variações.

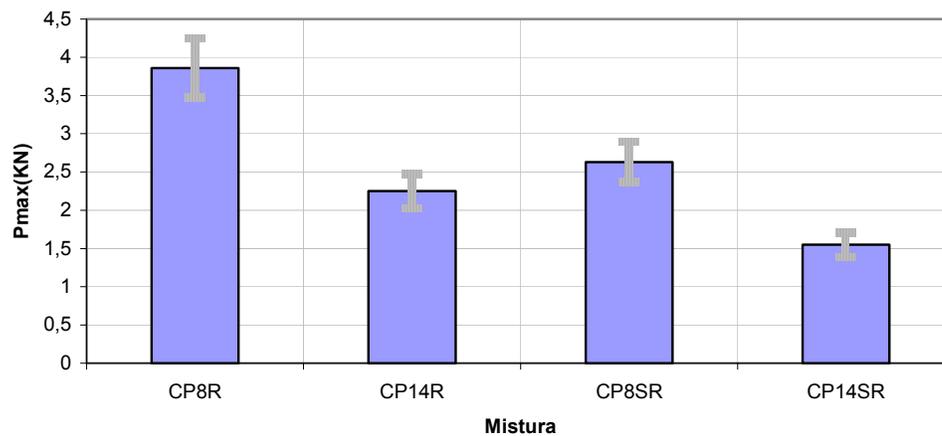


Figura 4-9 Valores da Carga Máxima com suas devidas variações.

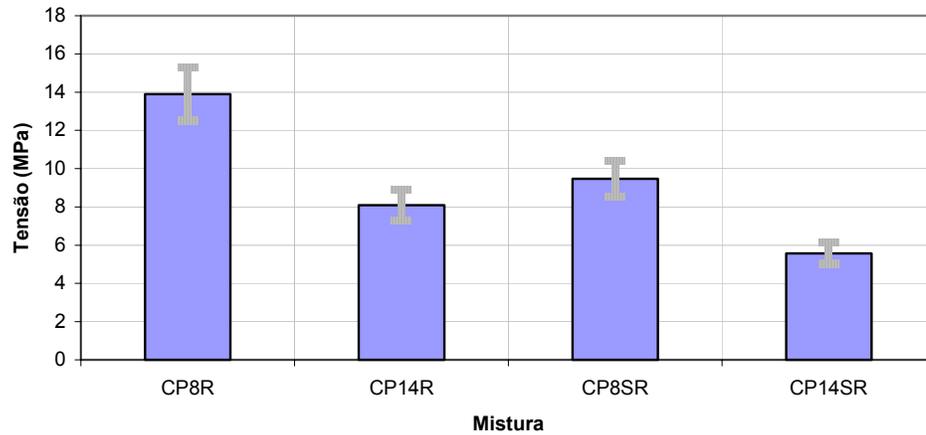


Figura 4-10 Valores da Tensão Máxima com suas devidas variações.

A Tabela 4-4 compara os valores neste trabalho com os valores determinados por Dos Anjos (2002) para o mesmo compósito, porém utilizando corpos de prova de tamanho diferente (6 x 36,5 x 120) mm. Os dados listados indicam uma convergência razoável entre os dois trabalhos. No entanto as diferenças observadas podem ser atribuídas ao fato que os corpos de provas utilizados neste trabalho são maiores que os fabricados por Dos Anjos (2002), o que poderia provocar um comportamento diferente durante a compactação da pasta úmida. Deve-se lembrar que esta etapa de compactação é importante devido a retirada do excesso de água e conseqüentemente da redução de vazios.

Tabela 4-4 Comparação entre os resultados obtidos dos ensaios de flexão deste trabalho e o de Dos Anjos (2002).

Mistura	Este trabalho		Dos Anjos (2002)	
	E_f (GPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	E_f (GPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
CP8R	13,56	13,90	10,00	14,80
CP14R	6,01	8,1	5,70	8,40
CP8SR	11,38	9,47	7,80	8,00
CP14SR	5,19	5,58	3,70	6,40

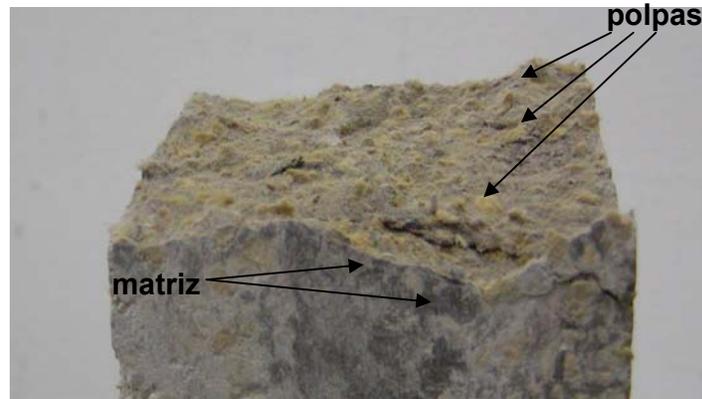


Figura 4-11 Superfície de fratura de espécime sem entalhe (CP8R).

A superfície de fratura dos corpos de prova apresentou uma superfície irregular (Figura 4-11). No entanto há uma homogeneidade entre polpa e matriz que só é visualizado em polpas refinadas, isto porque após o refino as polpas ficam menores (diâmetro e comprimento) podendo ser mais facilmente homogeneizadas.

4.4.

Ensaio de Flexão em três pontos em barras entalhadas

O ensaio de flexão em três pontos fornece dados sobre o carregamento aplicado e o deslocamento do ponto de aplicação da carga. Nas Figuras 4-12 e 4-13 são apresentadas as curvas da variação da carga aplicada com o referido deslocamento para os corpos de prova CP8R e CP14R entalhados.

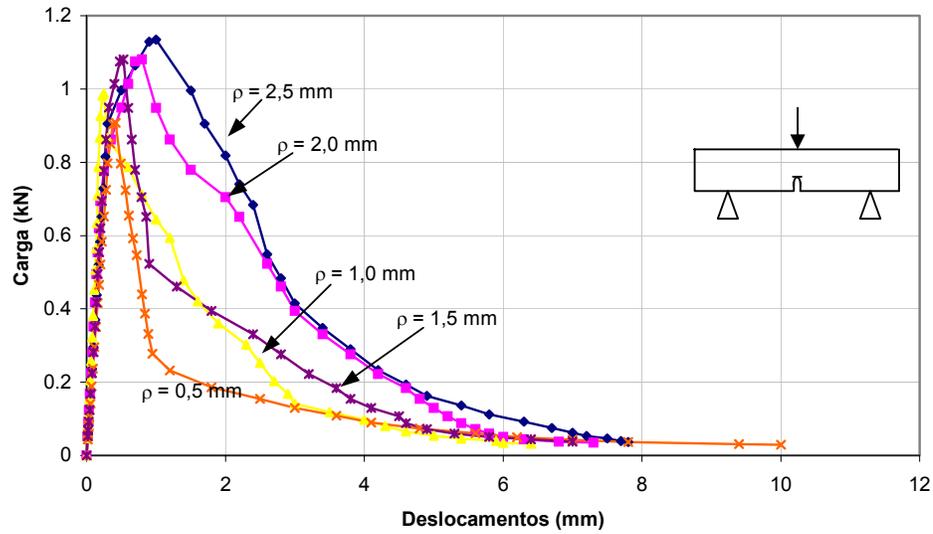


Figura 4-12 Curva carga-deslocamento para espécimes CP8R com entalhes.

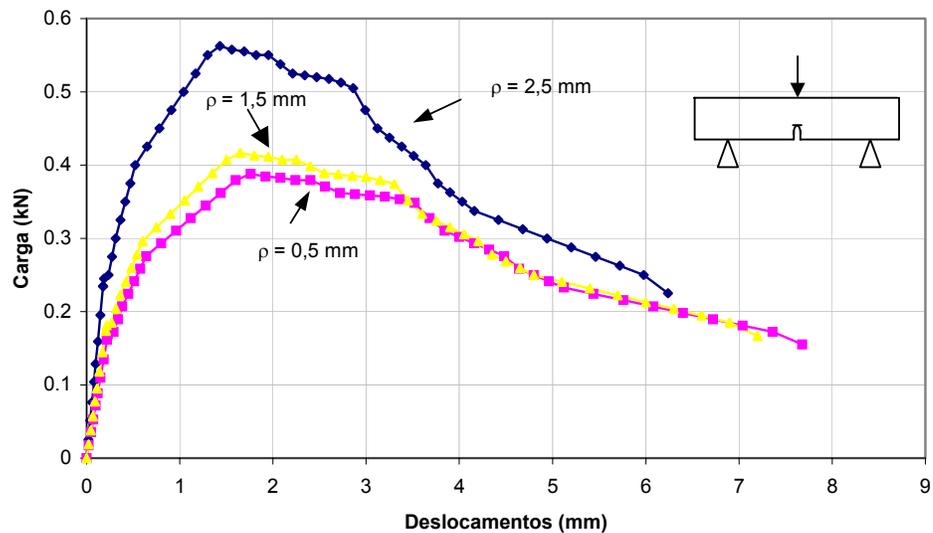


Figura 4-13 Curva carga-deslocamento para espécimes CP14R com entalhes.

A partir dessas curvas pode-se observar que tanto a carga máxima quanto a carga correspondente ao desvio da linearidade aumentam com o aumento do raio de curvatura, ρ , na ponta do entalhe. Os valores de carga máxima atingidos pelos corpos de prova estão listados na Tabela 4-5 em função do raio de curvatura do entalhe para CP8R e CP14R.

Através dos dados listados na Tabela 4-5 pode-se observar que o espalhamento dos valores da carga máxima atingida está situado ao redor de 10 %, o que significa uma boa reprodutibilidade aos dados experimentalmente levantados. Quanto à observação que a carga máxima na presença do entalhe é consideravelmente inferior á atingida nos corpos de provas não entalhado, isto se deve preliminarmente à redução considerável da área resistente do corpo de prova (devido à presença do entalhe) e no segundo lugar do efeito concentrador de tensões associado ao mesmo. Um ligeiro aumento da carga máxima é observado com o aumento do raio de curvatura, tal comportamento pode ser atribuído aos diferentes valores assumidos pelo fator de concentração de tensão, K_{σ} , devido presença do entalhe, isto é, a medida que o raio do entalhe aumenta o fator concentrador diminui e com isso um aumento a nível de carregamento do corpo de prova flexionado.

Tabela 4-5 Valores da carga máxima em termos do raio de curvatura para CP8R e CP14R.

ρ - (mm)	$P_{\text{máx}}$ CP8R - (kN)	$P_{\text{máx}}$ CP14R - (kN)
0,5	$0,91 \pm 0,09$	$0,38 \pm 0,04$
1,0	$0,99 \pm 0,10$	-
1,5	$1,08 \pm 0,10$	$0,42 \pm 0,04$
2,0	$1,08 \pm 0,09$	-
2,5	$1,13 \pm 0,11$	$0,56 \pm 0,05$

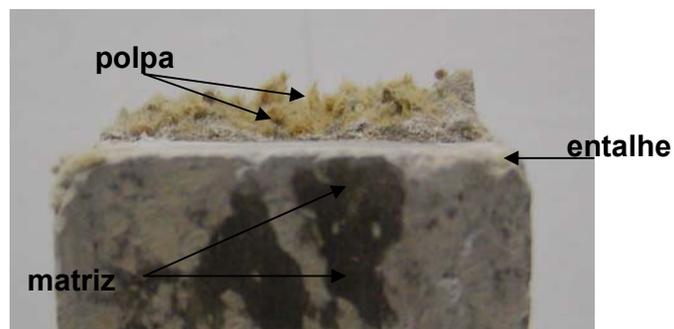


Figura 4-14 Superfície de fratura de espécime entalhado.

Em função do entalhe mostrado na Figura 4-14, estes corpos de prova apresentam metade da superfície de fratura em relação aos corpos de prova não

entalhados, assim existe uma superfície lisa e reta, correspondente ao entalhe, e uma parte fraturada pelo ensaio onde as polpas ficam salientes.

4.4.1.

Fator de concentração de tensão (K_σ)

O efeito concentrador de tensão, devido à presença do entalhe, pode ser avaliado aplicando as equações 2-4, 2-5 e 2-6, onde σ_{\max} corresponde a tensão atuante na ponta do entalhe para o nível de carregamento dentro da região linear elástica da curva carga-deformação. A tensão local (σ_{\max}) é determinada através da equação 4-2, onde ε_L representa a deformação local na ponta de entalhe estimada pela leitura do extensômetro eletrônicos dentro da região linear elástica. No que se refere o módulo de elasticidade (E_c) adotaram-se os valores obtidos no ensaio de compressão.

$$\sigma_{\max} = E_c \varepsilon_L \quad (4-2)$$

As Figuras 4-15 e 4-16 mostram as curvas carga-deformação na ponta do entalhe para os espécimes CP8R e CP14R. A Tabela 4-6 lista os valores de K_σ em função do raio de curvatura dos entalhes para os conjugados ensaiados.

Tabela 4-6 Fator concentrador de tensão (K_σ) determinado experimentalmente em função de ρ para CP8R e CP14R.

ρ - (mm)	CP8R	CP14R
	K_σ	K_σ
0,5	$3,34 \pm 0,20$	$3,78 \pm 0,22$
1,0	$2,48 \pm 0,15$	
1,5	$2,20 \pm 0,12$	$2,21 \pm 0,13$
2,0	$1,38 \pm 0,08$	
2,5	$1,08 \pm 0,06$	$1,12 \pm 0,06$

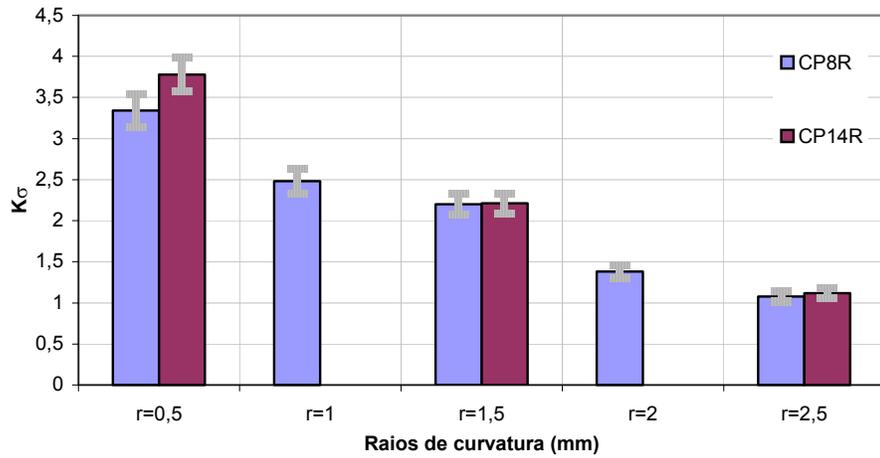


Figura 4-15 Valores de K_σ com suas devidas variações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0116465/CA

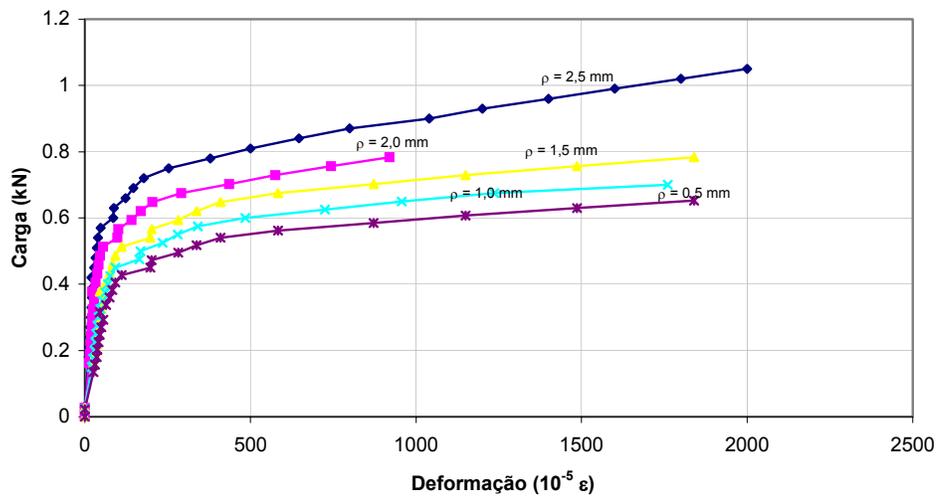


Figura 4-16 Variação carga-deformação na ponta do entalhe para o espécime CP8R.

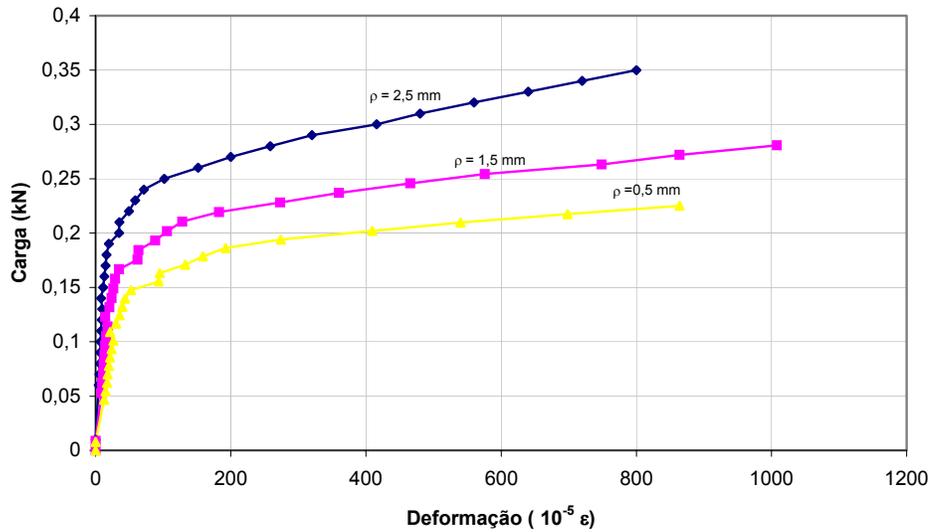


Figura 4-17 Variação carga-deformação na ponta do entalhe para o espécime CP14R.

4.4.2.

Fator de concentração de tensão (K_t) estimado teoricamente

Creager & Paris (1967) obtiveram a distribuição de tensões elásticas ao redor de furos elípticos e entalhes hiperbólicos. Para o sistema de coordenadas mostrado na Figura 4-14, O campo de tensão na ponta da descontinuidade (r, θ), para o modo I de carregamento, é dado pelas expressões 4-3, 4-4 e 4-5.

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \frac{\theta}{2} \frac{\sin \frac{3}{2}\theta}{\cos \frac{\theta}{2}} \right] - \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3}{2}\theta \quad (4-3)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \frac{\theta}{2} \frac{\sin \frac{3}{2}\theta}{\cos \frac{\theta}{2}} \right] + \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3}{2}\theta \quad (4-4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta - \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \frac{\rho}{2r} \frac{\sin \frac{3}{2}\theta}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (4-5)$$

onde ρ é o raio de curvatura na ponta da descontinuidade, K_I é o fator de intensidade de tensões descrito na equação 4-6 e 4-7 (Norma EGF P1-90, 1989).

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (4-6)$$

onde a função f é dada por:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \left[\frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}}{2\left[1+2\left(\frac{a}{W}\right)\right]\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}} \frac{L}{W} \left\{ 1,99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right) \left[2,15 - 3,93\left(\frac{a}{W}\right) + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \right\} \right] \quad (4-7)$$

É importante anotar que o centro das coordenadas é situado a uma distância $\rho/2$ medida a partir da ponta da descontinuidade, conforme mostrada na Figura 4-14.

Combinando as expressões 4-6 e 4-7 e substituindo $a/W = 1/2$, $W = 0,05$ m, $B = 0,045$ m e $L = 0,27$ m, obtemos a equação 4-8 que nos fornece o fator de intensidade de tensões, K_I , em $\text{MPam}^{1/2}$, em função da carga P em kN.

$$K_I = \frac{3PL}{BW^{3/2}} 0,888 = 1,4297P \quad (4-8)$$

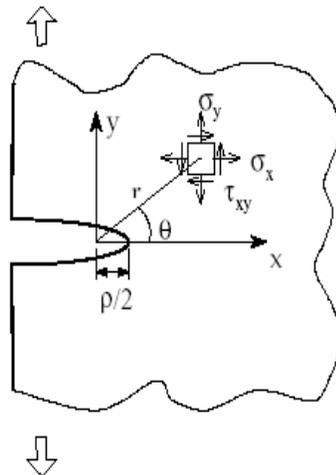


Figura 4-18 Sistema de coordenadas (Creager & Paris, 1967).

A tensão máxima ocorre na ponta do entalhe onde $\theta = 0$, e $r = \rho/2$, e de acordo com a equação 4-4, será dada por:

$$\sigma_{yy} = \sigma_{\max} = \frac{2K_I}{(\pi\rho)^{1/2}} \quad (4-9)$$

Substituindo a expressão 4-8 em 4-9, obtém-se a tensão máxima (σ_{\max}) em função do raio de curvatura e da carga P conforme equação 4-10.

$$\sigma_{\max} = \frac{2 * 1,4297P}{(\pi\rho)^{1/2}} = \frac{1,6132P}{\rho^{1/2}} \quad (4-10)$$

É importante lembrar que σ_{\max} é dado em MPa, P em kN e ρ em m.

Para ρ expresso em mm, a tensão σ_{\max} na ponta será dada por:

$$\sigma_{\max} = \frac{51,01P}{\rho^{1/2}} \quad (4-11)$$

Substituindo os valores de B, W e L na expressão 3-4, obtém se a tensão nominal (σ_N) em função da carga P conforme equação 4-12.

$$\sigma_N = 14,4P \quad (4-12)$$

onde σ_N está expressa em MPa e P em kN.

De posse da tensão na ponta do entalhe e da tensão nominal, o fator de concentração de tensão pode ser estimado a partir da expressão 4-13.

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_N} = \frac{3,54}{\rho^{1/2}} \quad (4-13)$$

As Figuras 4-19 e 4-20 comparam os valores de K_σ obtidos experimentalmente com os calculado a partir da expressão 4-13. Os valores de K_σ

teóricos e experimentais devem extrapolar para 1 para grandes valores de ρ ($\rho \rightarrow \infty$).

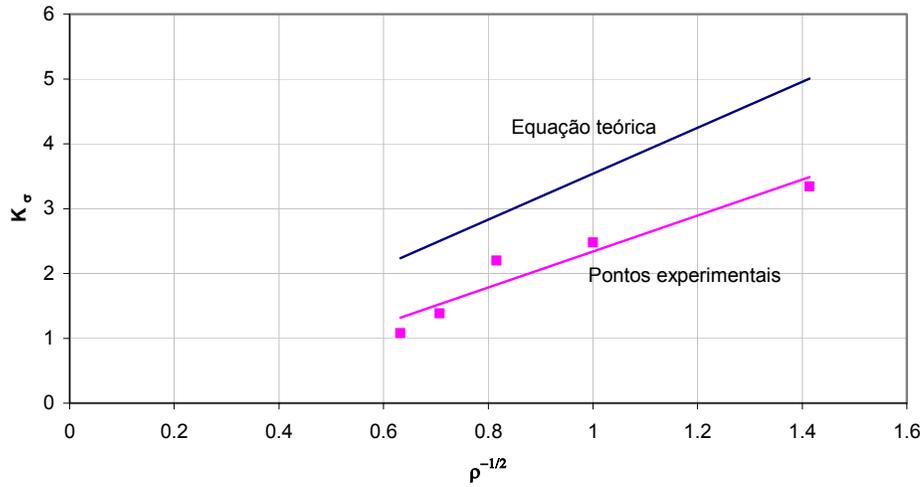


Figura 4-19 Comparação do fator K_σ com $\rho^{-1/2}$ para CP8R.

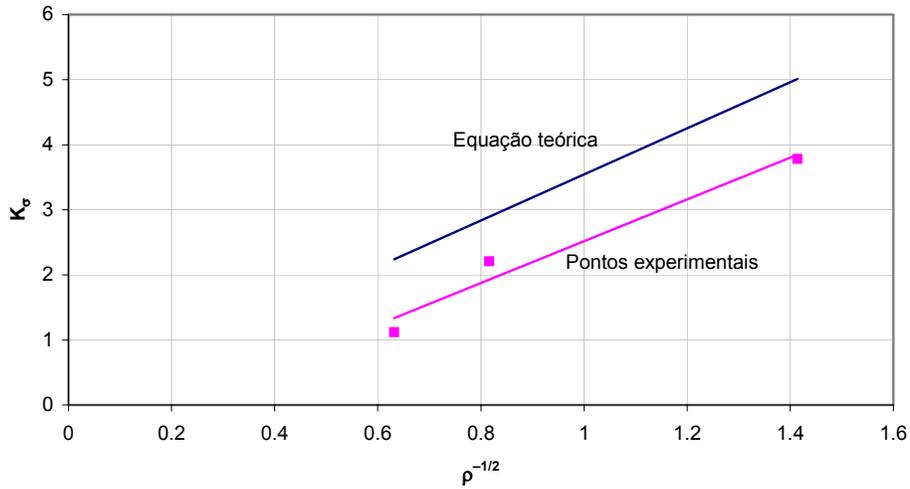


Figura 4-20 Comparação do fator K_σ com $\rho^{-1/2}$ para CP14R.

Observa-se a partir dessas curvas que K_σ experimental apresenta valores invariavelmente menores que os valores teóricos. Isto se deve ao fato que a

deformação ε_L , utilizada par o cálculo de σ_{\max} , representa uma deformação na direção y integrada sobre o comprimento total do extensômetro colado na frente da ponta do entalhe. Vale ressaltar que a deformação é máxima na ponta ($\rho/2,0$), tendo portanto níveis menores para outro ponto ao longo da base de medida do extensômetro.

4.5. Integral J

Com o uso da equação 2-14, e a partir dos dados levantados no ensaio de flexão em três pontos, foi possível calcular a magnitude da integral J na carga máxima. A energia U , correspondente à área sob a curva carga-deslocamento até a carga máxima, foi corrigida conforme descrito no item 2.6.1. Os valores de J , assim obtidos, são discriminados como J_{\max} e estão listados na Tabela 4-7 e apresentados nas Figura 4-22 em função do raio de curvatura, ρ , para os diferentes compósitos empregados.

Tabela 4-7 Integral J na carga máxima, J_{\max} , em função do raio de curvatura, ρ , para CP8R e CP14R.

(ρ) - (mm)	CP8R	CP14R
	J_{\max} - (N/mm)	J_{\max} - (N/mm)
0,5	$0,2132 \pm 0,021$	$0,7765 \pm 0,076$
1,0	$0,3547 \pm 0,034$	-
1,5	$0,5946 \pm 0,058$	$0,7819 \pm 0,077$
2,0	$1,0160 \pm 0,101$	-
2,5	$1,3823 \pm 0,125$	$0,9148 \pm 0,090$

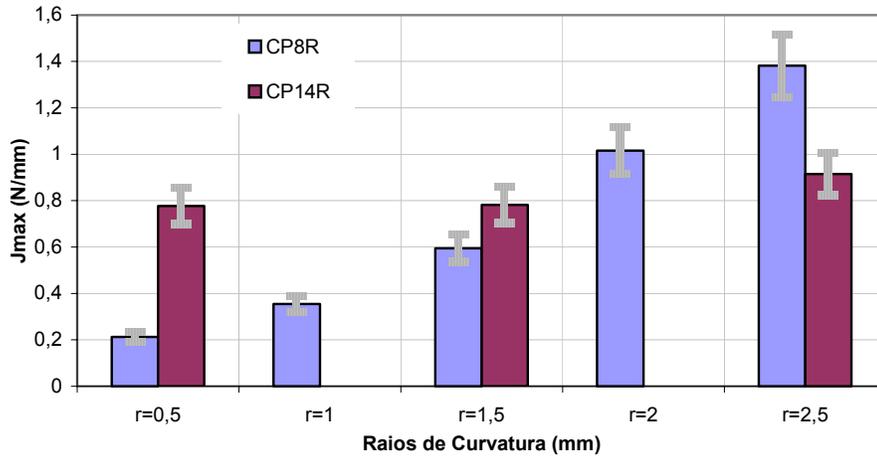


Figura 4-21 Valores de J_{max} com suas devidas variações.

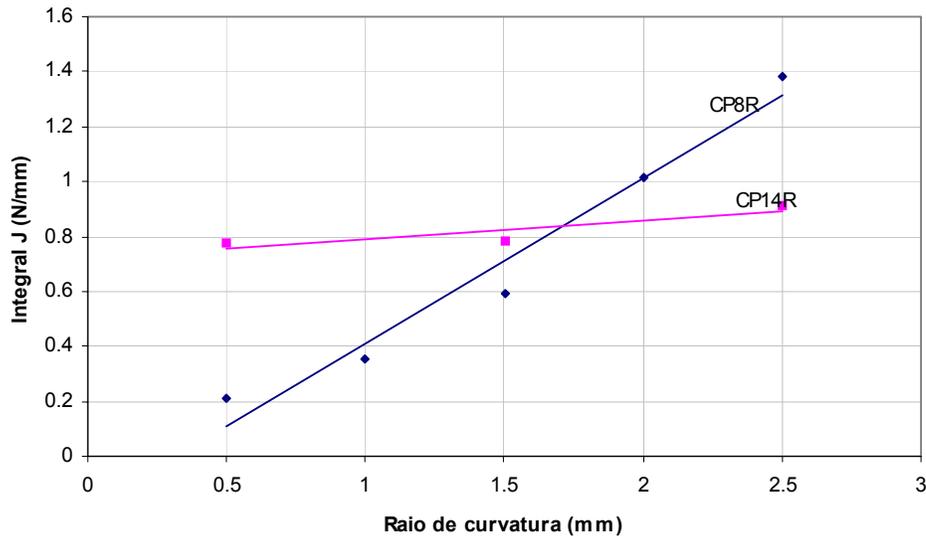


Figura 4-22 Variação da Integral J com o raio de curvatura (CP8R e CP14R).

Nota-se a existência de uma relação linear entre J_{max} e ρ para ambos os compósitos. No entanto, observa-se que o valor inicial de J_{max} , correspondente a $\rho = 0,5$ mm, é significativamente maior para CP14R do que para CP8R. Além disso, a taxa de aumento de J_{max} com o raio de curvatura ($dJ_{max}/d\rho$) é mais acentuada para CP8R em comparação a CP14R. Isto quer dizer que J na carga máxima é pouco sensível à variação de ρ para a maior fração volumétrica de polpa, pois com uma maior quantidade de reforço há uma maior quantidade de defeitos intrínsecos tornando o material pouco sensível aos defeitos sintéticos.

4.6. Análise Fractográfica e Microestrutural

Amostras dos quatro compósitos considerados neste trabalho foram retiradas de diferentes corpos de prova (utilizadas no ensaio de flexão e de impacto) e então preparadas de acordo com o procedimento descrito no item 3.2.4 antes de serem observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

As observações microscópicas indicam uma distribuição essencialmente randômica das polpas na matriz, verificada pelos sulcos deixados na mesma (fibras na seção transversal) e pelas fibras arrancadas no ensaio (fibras na seção longitudinal) conforme detalhado na Figura 4-23. Esta figura mostra indícios de fratura de fibras devido ao seu carregamento durante os ensaios.

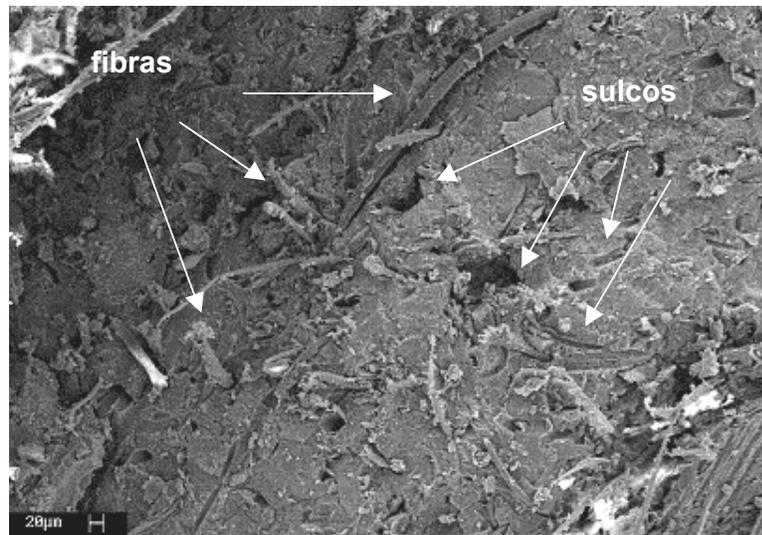


Figura 4-23 Arranjo das fibras no interior da matriz (CP8SR).

Os compósitos com polpa refinada apresentam uma predominância do fenômeno de arrancamento da fibra (“pull out”) enquanto que para a polpa sem refino é verificado o rompimento das mesmas (Figuras 4-24 e 4-25). No entanto os compósitos com polpa refinada apresentam um incremento de carga na flexão, isto quer dizer que o processo de refino resulta em fibras de melhor qualidade, especificamente de maior resistência. Como há fratura das polpas sem refino

pode-se dizer que a aderência entre estas e a matriz é de melhor qualidade que para as polpas refinadas. Então, o processo de refino pode aumentar a capacidade de carregamento do reforço, mas retira substâncias que agem a favor da aderência.

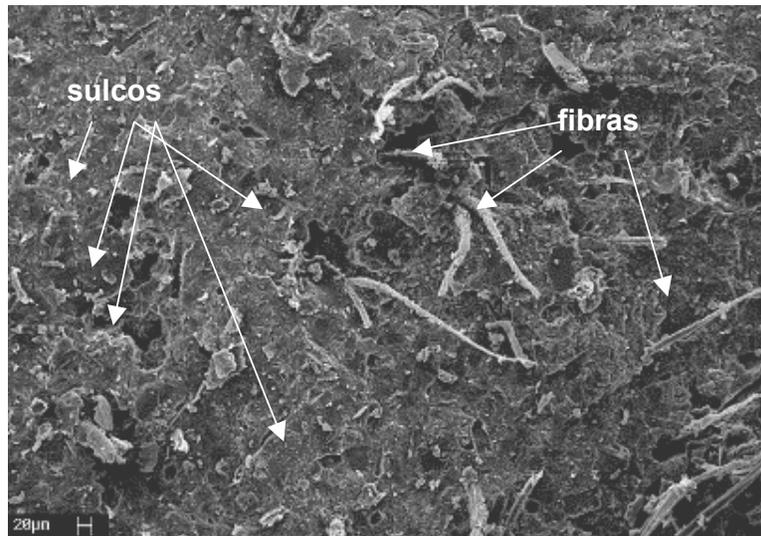


Figura 4-24 Compósito com 8% de polpa refinada (CP8R).

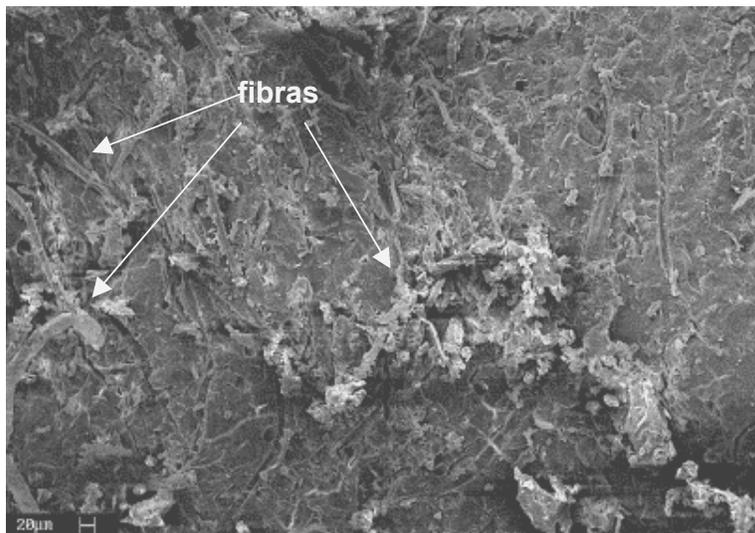


Figura 4-25 Compósito com 8% de polpa sem refino (CP8SR).

Compósitos com matrizes a base de cimento Portland são caracterizados por uma zona de transição nas vizinhanças das fibras, onde a microestrutura da matriz é consideravelmente diferente daquela das zonas distantes da interface. A natureza e tamanho dessa zona de transição dependem do tipo de fibra, da tecnologia de

produção e principalmente do tipo da matriz. A mistura fresca exerce uma influência importante na zona de transição, uma vez que ela leva à formação de vazios preenchidos com água em torno das fibras. Este fenômeno ocorre principalmente devido à segregação e acúmulo de água em torno bem como a um do reforço e arranjo ineficiente dos grãos de cimento na região em torno da superfície das fibras. Como consequência, a matriz na vizinhança da mesma se torna mais porosa do que a região afastada (Bentur & Mindess, 1990). A Figura 4-26 apresenta um detalhe da superfície de fratura destacando a interface fibra-matriz.

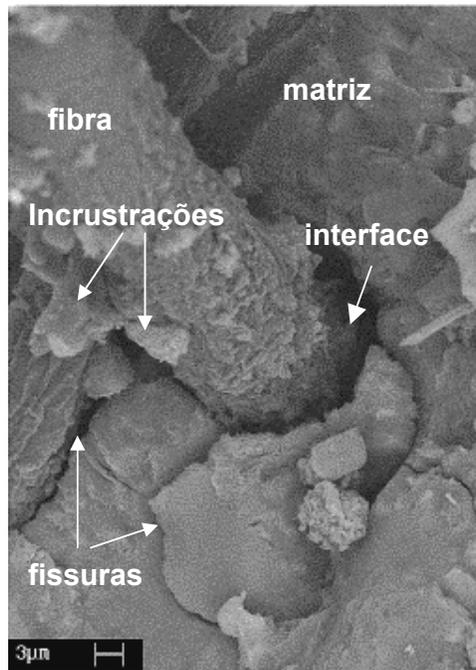


Figura 4-26 Detalhe da interface micro fibra-matriz (CP8R) após ensaios de ruptura.

A polpa sem refino apresenta fibras de superfície homogênea com forma lamelar (largura de aproximadamente 25 μm). Já a polpa refinada possui uma forma aproximadamente cilíndrica com diâmetro de 10 μm , sua superfície é aparentemente mais irregular que a superfície da polpa sem refino (Figuras 4-22 e 4-23). Embora exista alguma diversidade na composição química das paredes celulares, pode globalmente descrever-se a parede primária como sendo constituída por microfibrilas de celulose embebidas numa matriz de proteínas e de polissacarídeos – as hemiceluloses e a pectina, unidos entre si por múltiplas ligações químicas. A celulose é um polímero linear de vários milhares de

monômeros de glucose ligados entre si por ligações glicosídicas β (1 \rightarrow 4). As longas cadeias de celulose dispõem-se lado a lado formando micelas, com estrutura quase cristalina, cuja integridade é mantida por ligações de hidrogênio entre os numerosos grupos OH- adjacentes. As micelas associam-se formando as microfibrilas de celulose que atingem diversos micrometros de comprimento e 3-10 μm de diâmetro (Pais & Barroso, 1999).

O processo de refino retira esta matriz protéica e polissacarídea deixando praticamente só microfibrilas de celulose conforme comparação entre as micrografias obtidas neste trabalho (Figuras 4-27 e 4-28) e os esquemáticos apresentados na literatura (Figuras 4-29 e 4-30).

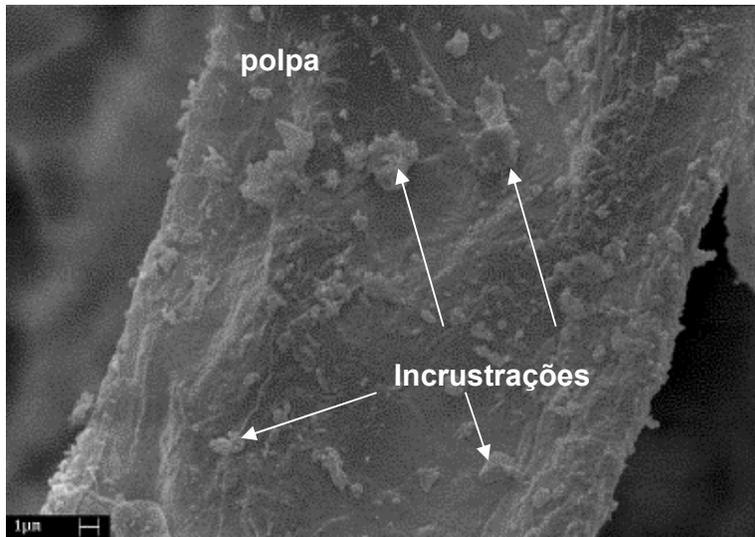


Figura 4-27 Micrografia da superfície da polpa sem refino.

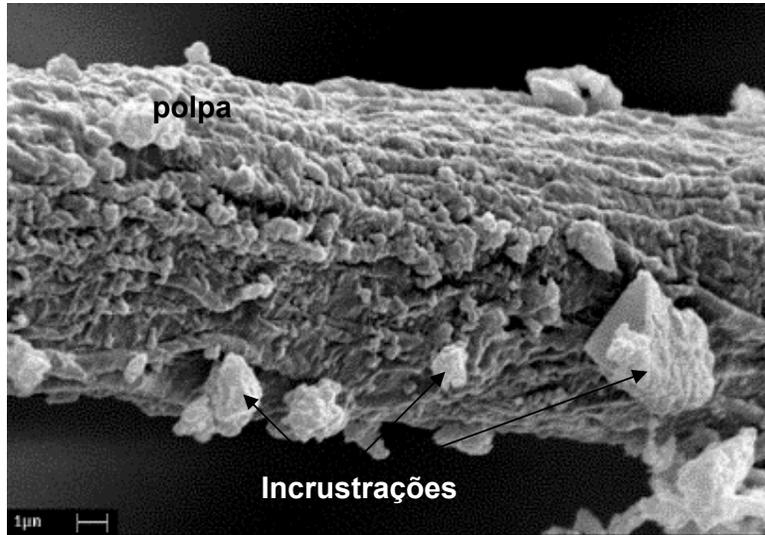


Figura 4-28 Micrografia da superfície da polpa refinada.

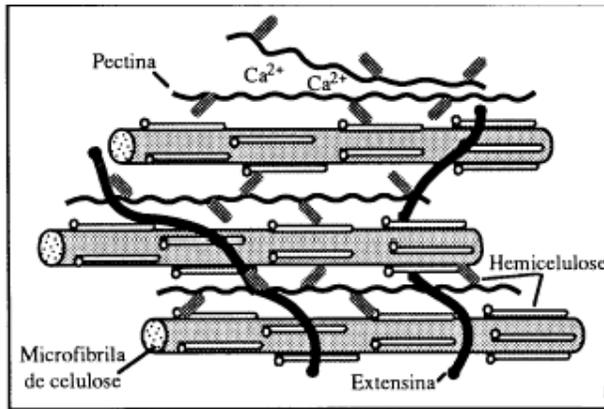


Figura 4-29 Diagrama esquemático da estrutura da parede celular primária de uma célula vegetal (Pais & Barroso, 1999).

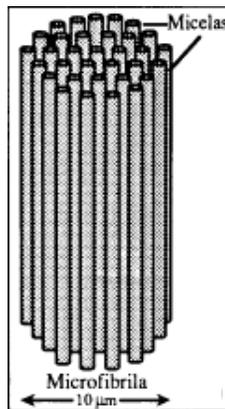


Figura 4-30 Diagrama esquemático da estrutura de uma microfibrila de celulose (Pais & Barroso, 1999).

Em todas as amostras coletadas constatou-se a presença de incrustações na superfície da fibra (Figuras 4-31 e 4-32). Pela forma dos cristais claramente apresentados na Figura 4-33 e pelo espectro fornecido pelo EDS (Figura 4-34) verificou-se que estas incrustações são óxidos e silicatos de cálcio e alumínio decorrentes da matriz. Nota-se que em polpas sem tratamento estes cristais são menores que os observados nas fibras tratadas. Provavelmente o tamanho dos cristais está ligado a absorção de água, uma vez que as cadeias polissacarídeas e protéicas são altamente higroscópicas e estas estão em maior quantidade nas fibras sem tratamento, e assim sendo, haveria menor quantidade de água livre para hidratação e crescimento dos cristais de silicatos de cálcio e alumínio.

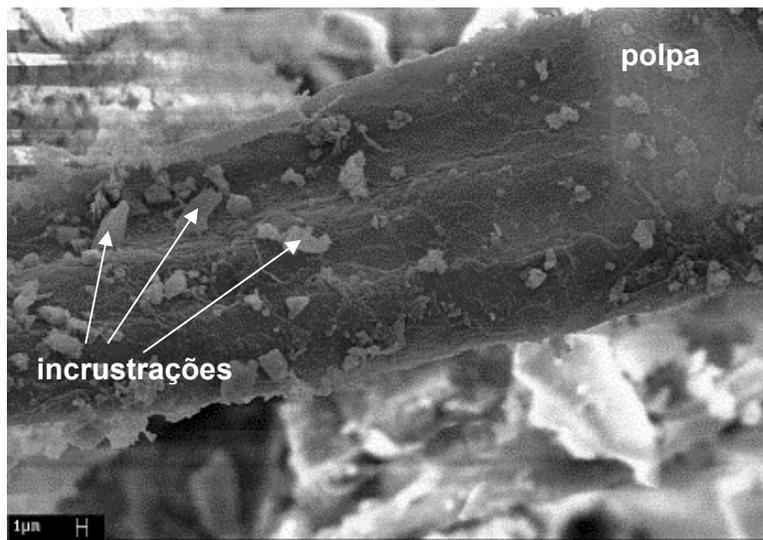


Figura 4-31 Incrustações em fibras de polpa sem refino.

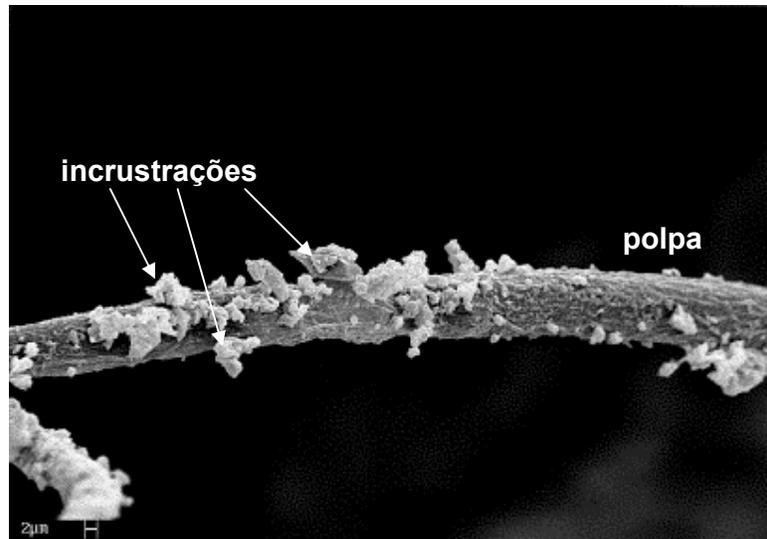


Figura 4-32 Incrustações em fibras de polpa refinada.

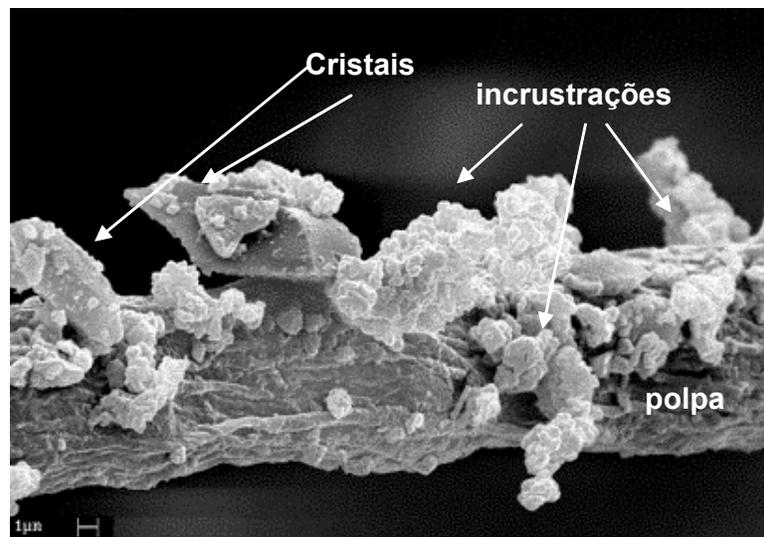


Figura 4-33 Detalhe dos cristais na superfície de polpa refinada.

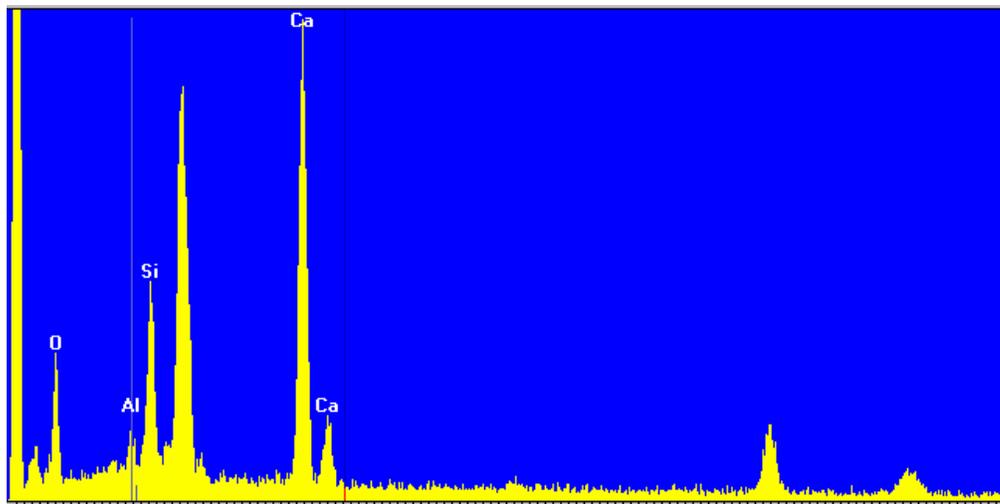


Figura 4-34 Espectro fornecido pelo EDS.