

4.

Resultados e discussão**4.1 Análise microestrutural**

As amostras que apresentaram os valores extremos das propriedades mecânicas no ensaio de flexão foram preparadas de acordo com os procedimentos descritos anteriormente e analisadas por MEV e MOD, para caracterizar a microestrutura e avaliar se a variação dos valores das propriedades mecânicas poderia ser correlacionada com algum parâmetro microestrutural. Na análise por MOD foram feitos dois mosaicos com 50 quadros cada (10 X 5), cobrindo a seção transversal total das amostras.

A Figura 17 mostra as características microestruturais observadas para a pupunha, onde se destacam fibras orientadas axialmente ao longo do comprimento do estipe e o lúmen para transporte de nutrientes. Além disso, pode ser observado também que existem fibras orientadas em outras direções, que atuam no sentido de dar resistência multiaxial à pupunha, formando uma estrutura semelhante à de um compósito laminado (d'Almeida et al. 2008). Como os demais materiais lignocelulósicos a pupunha é composta basicamente por celulose e lignina. A celulose é um polímero de cadeia longa e que se organiza em fibrilas. As fibrilas são organizadas paralelas umas às outras, formando as fibras. A Figura 18 mostra, em diferentes escalas, detalhes da microestrutura da seção transversal da pupunha.

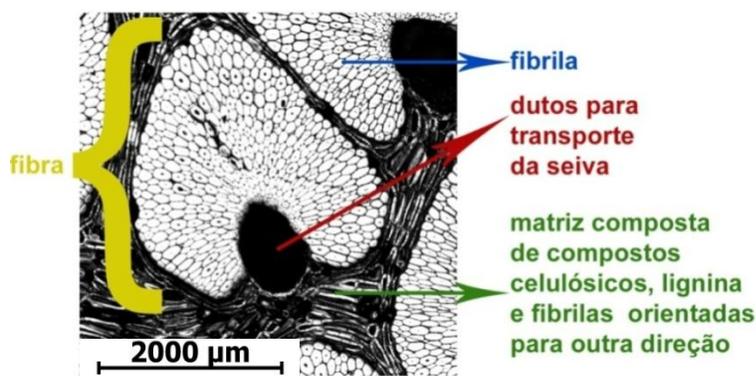
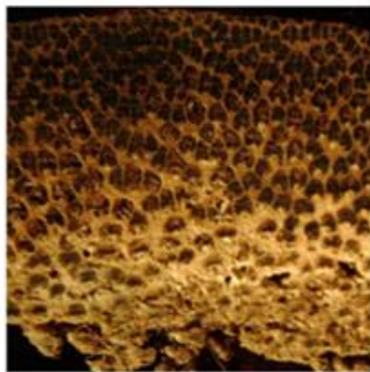
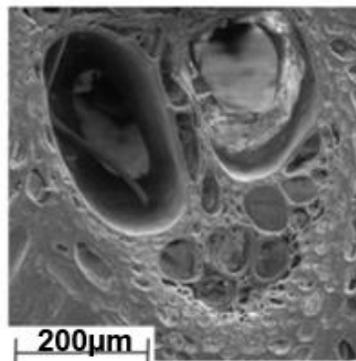


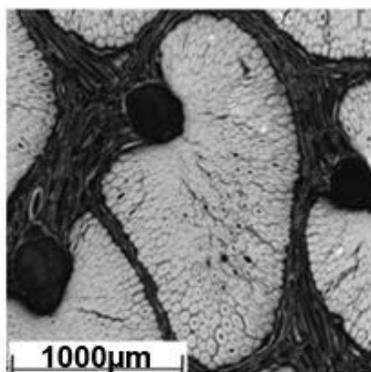
Figura 17 – Microestrutura do estipe da pupunha.



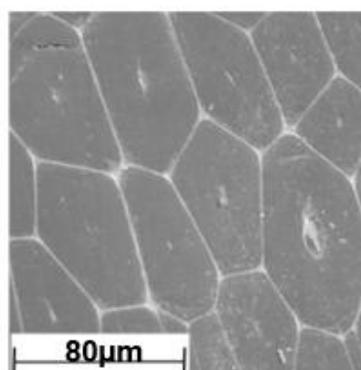
a) Seção transversal do estipe que mostra a diferença de concentração de fibras. A parte externa está no topo da figura.



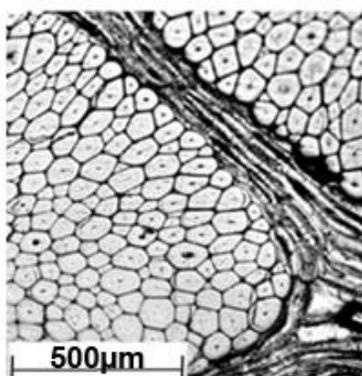
d) Dutos para transporte da seiva, (MEV, 150X).



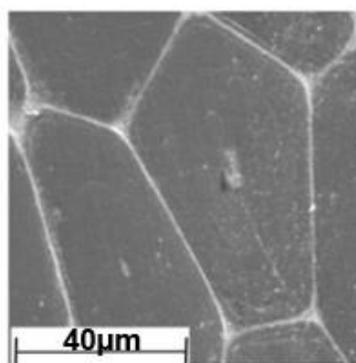
b) Aspecto da microestrutura mostrando as fibras, o lúmen e a matriz, (MO, 50X).



e) Aspecto das fibrilas, (MEV, 500X).



c) Detalhe das fibras dispostas em diferentes direções, (MO, 100X)



f) Detalhe de uma fibrila, (MEV, 1000X)

Figura 18 – Detalhes da seção transversal do estipe da pupunha.

A análise por MOD revelou que, de fato, os valores das propriedades mecânicas são bastante influenciados pelos aspectos microestruturais do estipe da pupunha e do coqueiro. Os mosaicos representativos das seções transversais das amostras de pupunha que foram submetidas ao ensaio de flexão e obtiveram, respectivamente, o menor e o maior valor de tensão de ruptura estão mostrados na Figura 19a e 19b. As medidas das frações em área das fibras para cada amostra foram de 53% e 61%, respectivamente, indicando que a fração de fibras dispostas axialmente em relação ao eixo do estipe é um parâmetro importante no comportamento mecânico da pupunha.

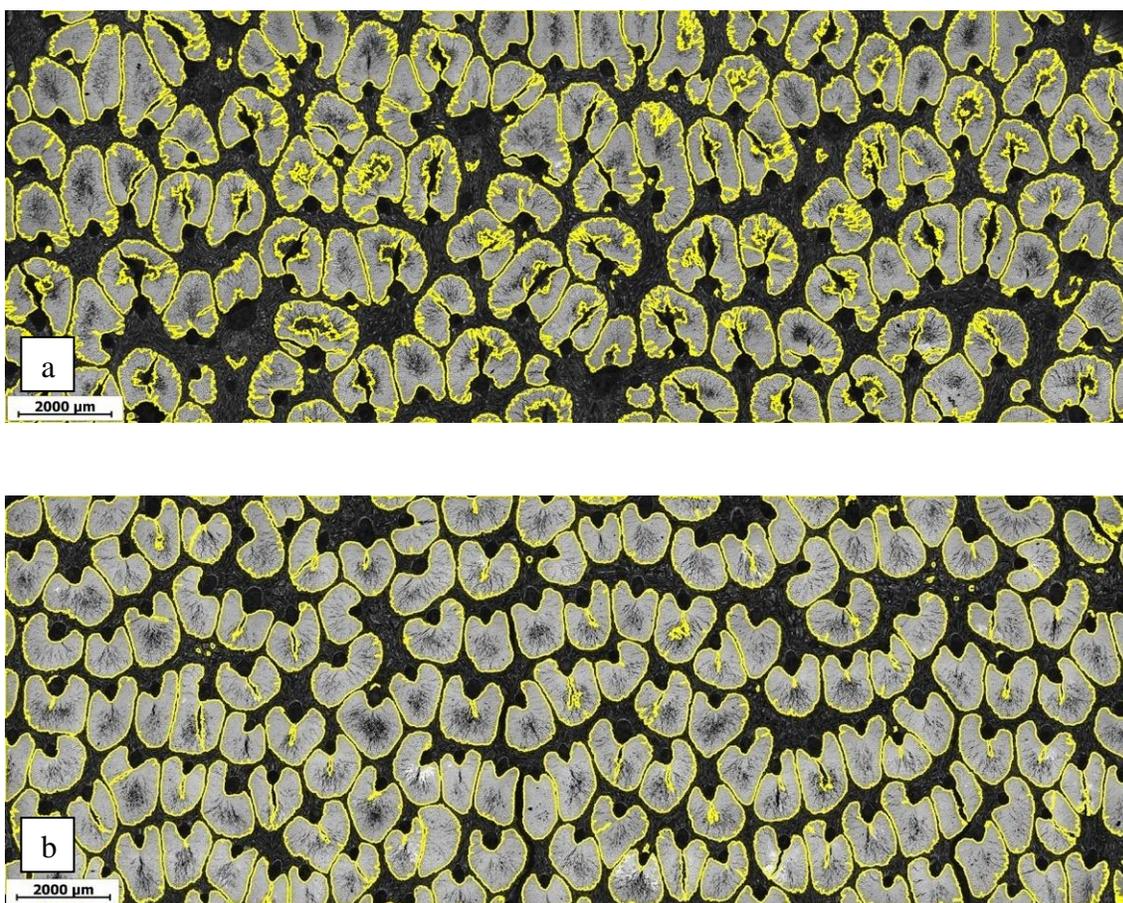


Figura 19 – Mosaico (10 x 5) das seções transversais do estipe. (a) Seção transversal do corpo de prova que apresentou o menor valor da tensão de ruptura em flexão; (b) Seção transversal do corpo de prova que apresentou o maior valor da tensão de ruptura em flexão.

A Figura 20 mostra uma seção transversal ao eixo do estipe do coqueiro. Também se pode observar a presença de fibras alinhadas longitudinalmente, porém com menor fração de área (31%) ocupada pelas fibras. Essa menor fração de área

pode ser diretamente responsável pela menor resistência mecânica à flexão do coqueiro em relação à pupunha, conforme será visto no item 4.4.1 e 4.4.4.

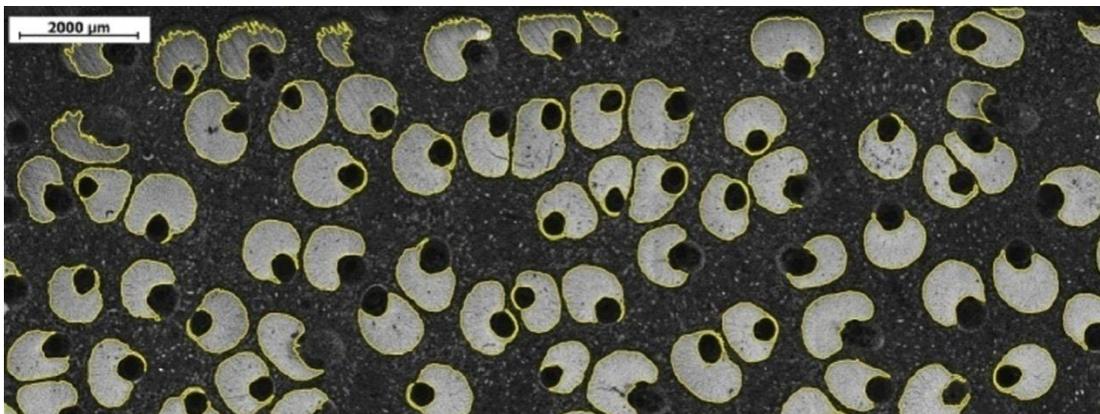


Figura 20 – Mosaico (10 x 5) da seção transversal do estipe do coqueiro

Os mosaicos da figura 19 e 20 confirmam o que foi observado em outros estudos que afirmam existir uma relação entre a resistência, no ensaio de flexão, com a densidade, (Cordovil et al., 1995). Para a pupunha e o coqueiro, essa relação pode ser inferida partindo-se do princípio que a densidade é relacionada ao grau de empacotamento atômico, que varia conforme a cristalinidade. Quanto maior for a fração de fibras, mais celulose terá o material e maior será a quantidade de material cristalino presente.

Nos mosaicos da Figura 21 analisou-se a fração volumétrica de fibras de uma amostra retirada a 1,5 de altura (Figura 21a) e de uma retirada da base (Figura 21b). Pôde-se constatar, através de análise visual, que o corpo de prova basal possui mais fibras orientadas na direção axial. Esse resultado confirma o que utilizadores da madeira de pupunha e do coqueiro já haviam comprovado de forma empírica, alegando que a madeira basal é a mais resistente.

Foi feita ainda, uma análise do gradiente de concentração de fibras na espessura do estipe da amostra basal (Figura 21c).

Através das porcentagens das concentrações de fibras pode-se relacionar a dados da literatura e com isso identificar as partes do corpo de prova e sua respectiva

função no estipe. Observou-se que a parte mais externa, amarela, é uma transição entre a casca e o floema. A casca é responsável por proteger os tecidos vivos da árvore, portanto é composta de tecido inativo com baixo teor de celulose. O floema por ter a função de conduzir seiva, necessita de muitas fibras, tanto na direção axial como na radial, por isso pode-se deduzir que ele ocupa a parte rosa e vermelha da Figura 21. A parte seguinte, por dedução, é o xilema que tem a função de conduzir água e dar resistência ao estipe. Isso se traduz em mais fibras orientadas axialmente, (fragmento azul claro e verde). A parte azul escuro é a transição entre o xilema e a medula. A medula é caracterizada pelo armazenamento de substâncias nutritivas, fato esse que se manifesta através de poucas fibras axiais.

Martin (2009) relacionou a variação do índice de cristalinidade ao longo do comprimento axial com a variação da resistência mecânica e observou, que para o sisal, o decréscimo das propriedades mecânicas, (resistência à tração e módulo de elasticidade), da parte basal para apical é de um terço.

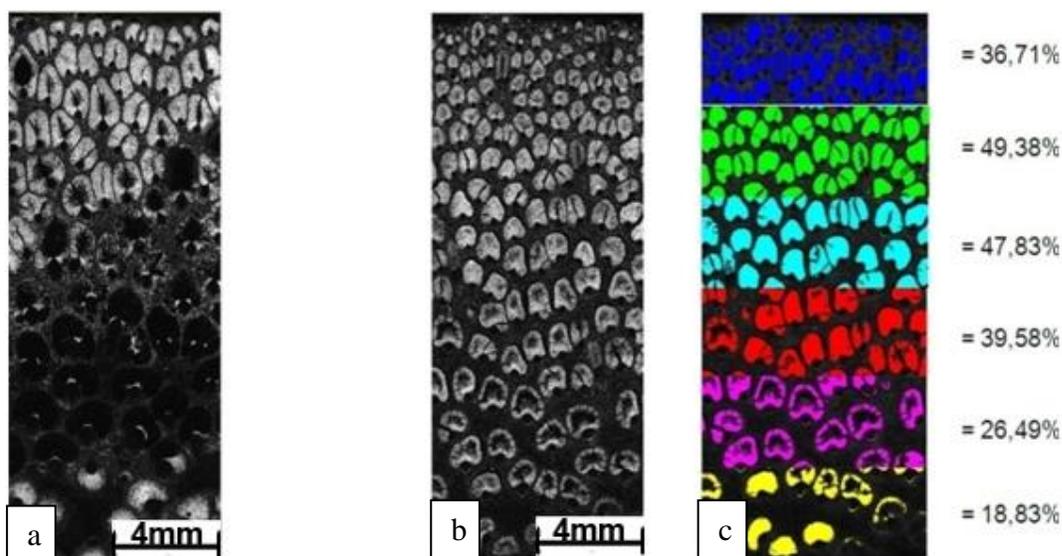


Figura 21 - a) Seção da altura do peito. b) Seção basal. c) porcentagem do gradiente de concentração de fibras da espessura da amostra da seção basal.

Cabe ressaltar ainda, que ocorreram alguns problemas em relação a preparação da superfície das amostras. Durante as etapas de lixamento e polimento, por vezes, começaram a ocorrer rachaduras a partir dos dutos, transversalmente ao plano de polimento, conforme mostrado na Figura 22. Nem sempre esse problema ocorreu,

mas nas amostras em que isso ocorreu, apareceram trincas em grande parte das fibras. Não ficou claro o motivo desse problema, mas pode ser devido a uma rápida desidratação das fibras, causada pelo álcool, usado durante a secagem das amostras entre as etapas de lixamento/polimento.

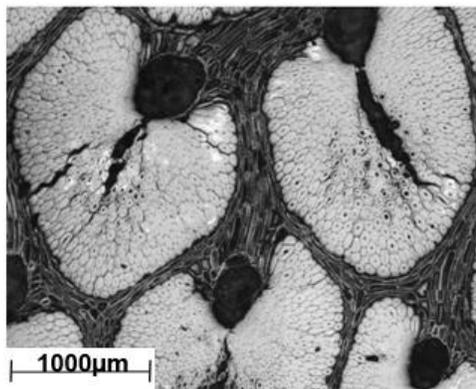


Figura 22 - Rachaduras nas fibras oriundas do processo de preparação da amostra.

4.1.1 Composição química da pupunha

Tendo em vista que parte da análise microestrutural foi realizada no MEV, usou-se o equipamento de EDS para fazer uma análise química qualitativa do estipe da pupunha. Conforme descrito anteriormente na revisão bibliográfica, os materiais lignocelulósicos são formados basicamente de celulose, lignina e hemicelulose. Estes são chamados de componentes principais (Philipp et al., 1988) e por sua vez são constituídos de C, O e H. Esses três componentes, juntos, constituem mais de 90% da estrutura dos materiais lignocelulósicos.

Porém, a Figura 23, obtida por EDS, mostra que outros elementos também estão presentes, a saber: K, Ca e Cl. A presença desses elementos é comum em diversas espécies vegetais, tal como na bucha, e pode ser atribuída não só à composição do solo no qual a pupunheira cresceu, mas também a elementos presentes em constituintes secundários existentes nas espécies vegetais e que são responsáveis, entre outras coisas, pela resistência natural ao apodrecimento e propriedades abrasivas (Philipp et al., 1988)

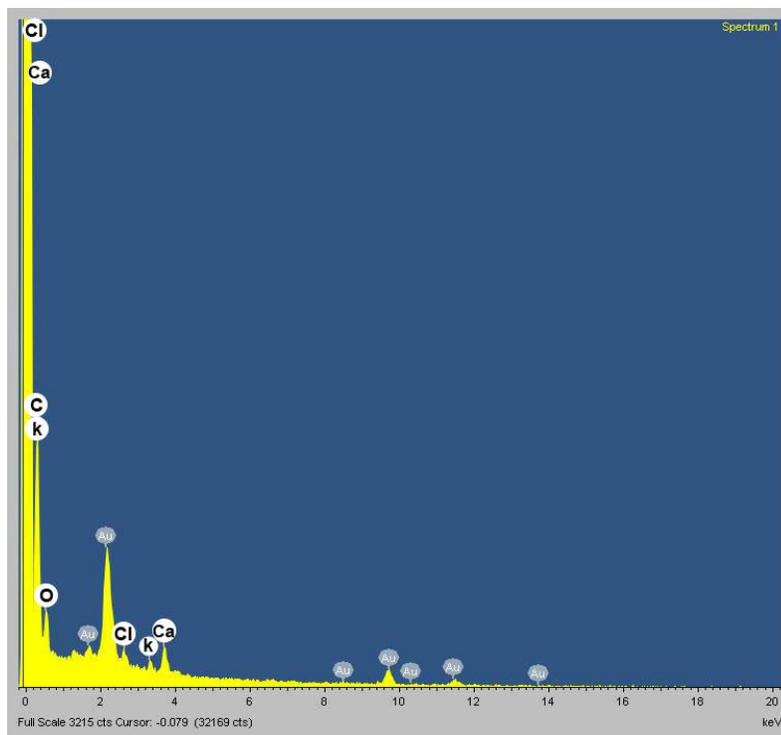


Figura 23 - Análise química qualitativa da pupunha.

4.2 Análise termogravimétrica (TGA).

A análise termogravimétrica mostrou que a decomposição térmica da pupunha ocorre em três estágios distintos, Figura 24. Inicialmente, e

C, ocorre perda de massa de cerca de 8%, relativa à perda de umidade. Esse valor concorda com valores medidos para outros materiais lignocelulósicos, tais como juta e bucha, e também com valores medidos para as fibras de outra palmeira como piaçava e do colmo do bambu (d'Almeida et al., 2006).

C pode ser atribuída à degradação da celulose e da hemicelulose. Entretanto não se pode afirmar a temperatura de decomposição da hemicelulose porque ela é uma mistura de polímeros formados por diferentes unidades de açúcares, inclusive pelo monossacarídeo formador da celulose, e que varia de espécie para espécie. Pode-se

supor no entanto que a parte da hemicelulose que é formada pela mesma unidade da celulose se degrada ao mesmo tempo.

Outra interpretação possível e mais coerente na literatura é que a segunda etapa de degradação que começa a cerca de 200°C está ligada à decomposição da hemicelulose. A temperatura na qual ocorre a taxa máxima de perda de massa nessa região foi de aproximadamente 290 °C. Embora esse valor seja ligeiramente superior ao intervalo de temperatura normalmente associado à decomposição da hemicelulose em fibras lignocelulósicas - de 260 a 281°C - isso não é inesperado, uma vez que a temperatura de degradação pode ser alterada pelas diferenças intrínsecas entre materiais lignocelulósicos de diferentes espécies (Schniewind, 1979), dado que a composição varia e, portanto, as interações entre os diferentes compostos também variam, afetando todo o conjunto de propriedades das fibras, incluindo os picos de temperatura de degradação (d'Almeida. 2008).

A terceira etapa de degradação estaria, assim, associada à decomposição térmica da celulose. O valor de temperatura no qual ocorre a taxa máxima de perda de massa nessa região (368 °C) concorda muito bem com dados na literatura (Das et al., 2000).

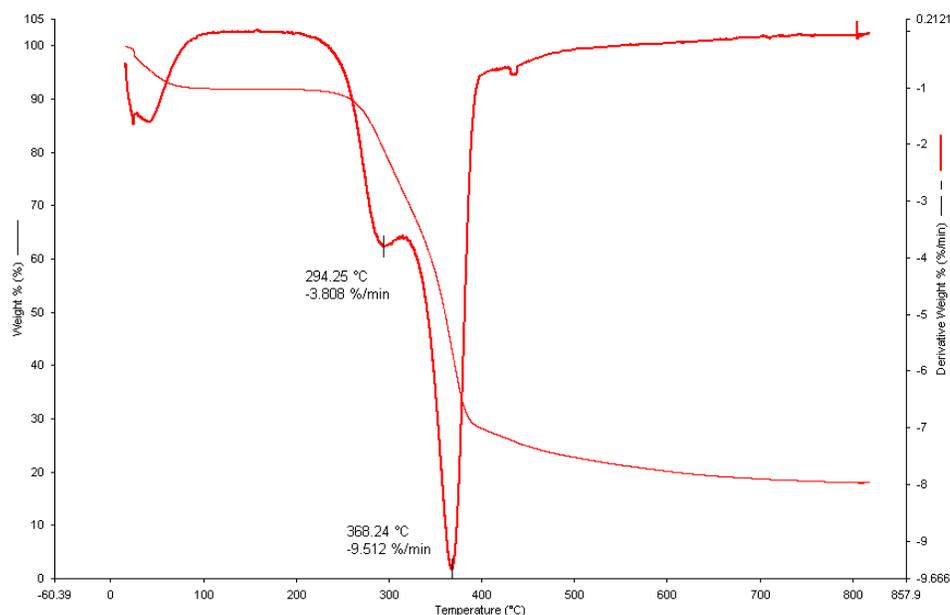


Figura 24 – Termograma típico obtido para a pupunha.

4.3 Difração de Raios-X (DRX).

As propriedades mecânicas dos materiais lignocelulósicos são fortemente dependentes do índice de cristalinidade dos mesmos. Esse índice indica a quantidade de celulose que se encontra no estado cristalino, já que a celulose é o único dos componentes principais (celulose, hemicelulose e lignina) que pode ter alguma cristalinidade. A partir disso podemos inferir se o material será mais ou menos denso, já que quanto mais cristalino, menos espaços vazios existirão.

O resultado da análise por difração de raios-X está mostrado na Figura 25. O principal pico observado em 22,3° corresponde à difração do plano (002) da celulose nativa (d’Ameida et al., 2006), (Rong et al., 2001), (Georget et al., 1999). O pico mais largo observado em torno 16,5° deve corresponder ao sinal dos planos (101) e . A falta de resolução das reflexões destes picos também foi observada nas fibras de sisal (Rong et al., 2001) e de caroá (d’Almeida et al., 2008), sendo atribuída à natureza semicristalina da celulose. O pico em 34,6° corresponde ao plano (040), e é também característico da celulose nativa (Rong et al., 2001), (Georget et al., 1999).

A partir do espectro de raios-X, o índice de cristalinidade da pupunha foi calculado a partir da relação (Rong et al., 2001) e (Tserki et al., 2005):

$$\text{Cristalinidade(\%)} = (I_{002} - I_{\text{am}}) / I_{002} \times 100$$

onde I_{002} é a intensidade da reflexão do plano (002) e I_{am} é a intensidade da reflexão do material amorfo em $2\theta = 18^\circ$. O índice de cristalinidade obtido foi de aproximadamente 70%. Esse valor é comparável ao de diversos materiais lignocelulósicos, tais como o rami, 69-83%, juta 64-71%, sisal, 62%, fibras de madeira de *Pinus silvestris* e caroá, 65%.

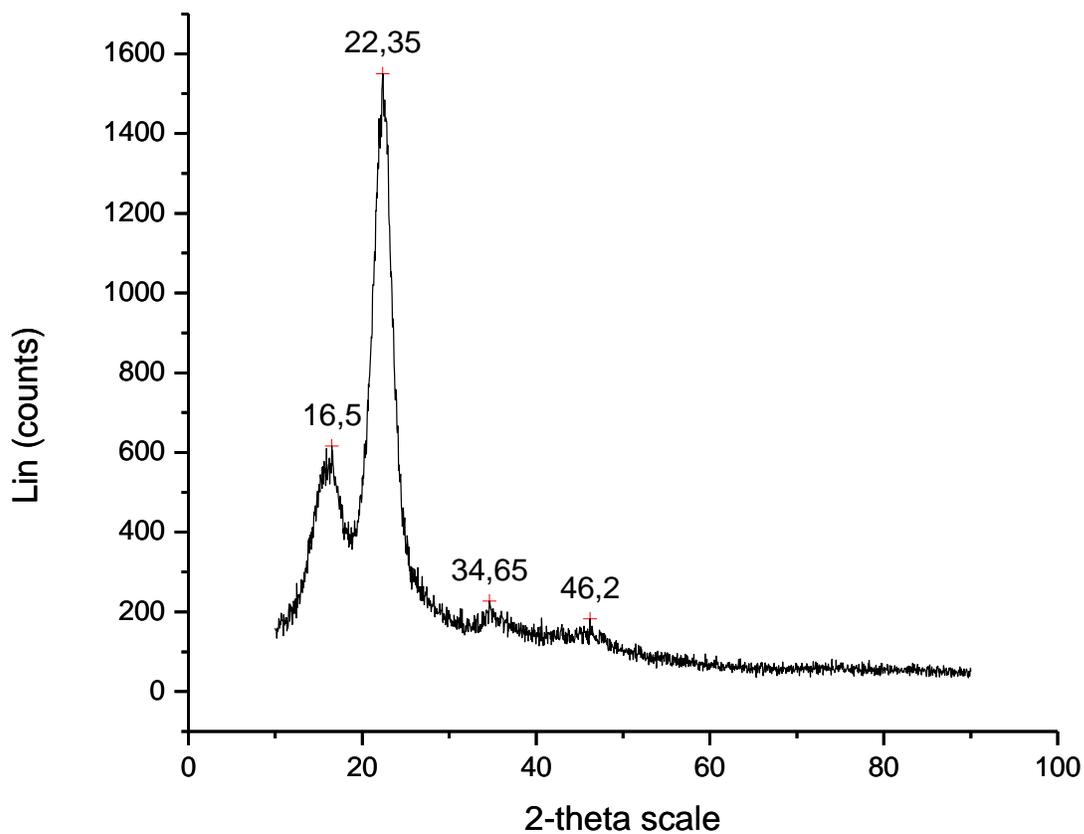


Figura 25 – Difractograma da pupunha.

4.4 Ensaio de flexão

4.4.1 Pupunha sem tratamento

A Figura 26 mostra uma curva representativa do comportamento em flexão da pupunha. Pode-se observar que, inicialmente, a pupunha apresenta um comportamento linear e que a falha não ocorre de maneira brusca, mas sim de modo gradual, até ser alcançada uma tensão máxima, onde há, então, uma queda brusca da resistência. Entretanto, não há separação da peça em duas partes distintas.

A Tabela 2 mostra os resultados dos ensaios de flexão. Dois pontos devem ser destacados dos dados listados. Primeiramente, tanto os valores da tensão de ruptura, quanto do módulo de elasticidade da pupunha, são bastante elevados em comparação

com valores de outros materiais lignocelulósicos, como o bambu (Paes et al. 2009) e até mesmo de materiais já estabelecidos na indústria de construção civil e mobiliário, como por exemplo a madeira do jatobá (Dias et al 2004) e da maçaranduba e mesmo de alguns compósitos de matriz polimérica. (Chacón et al., 2007). A seguir, deve-se destacar os baixos valores obtidos para o desvio-padrão, os quais são muito inferiores aos valores usualmente medidos quando são analisados materiais de origem natural. Esse resultado indica uma boa uniformidade do material analisado. Deve-se ainda, logicamente, aumentar o tamanho da amostragem para se ter dados estatísticos mais significativos. Porém os resultados obtidos mostram claramente que a pupunha pode ser encarada como sendo um material estrutural.

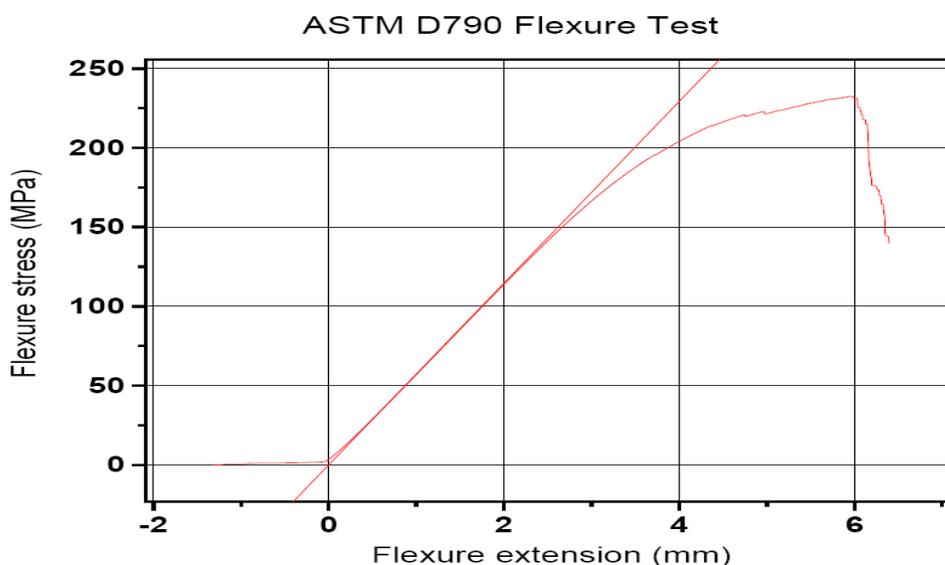


Figura 26 –Curva tensão-alongamento em flexão típica obtida para a pupunha.

4.4.2 Pupunha após imersão em água.

Os resultados obtidos para a resistência à flexão após secagem e imersão da pupunha em água destilada não apresentaram variação estatisticamente significativa em relação à pupunha testada sem tratamento. Pode-se observar, entretanto, que houve um aumento do desvio padrão para esses resultados (Tabela 2). Na Tabela 2

pode-se observar, também, que houve um ligeiro aumento do módulo de elasticidade e uma ligeira redução da deformação. esses resultados parecem indicar que houve extração de compostos solúveis da pupunha durante a imersão, enrijecendo o material. Um comportamento semelhante pode ser observado em relação a materiais poliméricos sintéticos, como por exemplo o Polietileno de alta densidade, PEAD, quando exposto a determinados fluidos (Torres, 2007). Tempos de imersão maiores devem ser analisados para se poder verificar o tempo a partir do qual as propriedades mecânicas começarão a reduzir devido a absorção de água.

Tabela 2 – Propriedades em flexão da pupunha e de alguns materiais estruturais.

	Tensão máxima (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Deformação (%)
Pupunha	214 ± 12	20,3 ± 1	1,8 ± 0,1
Pupunha imersão	220 ± 17	22,1 ± 1	1,6 ± 0,1
Pupunha envelhecida	196 ± 14	22,4 ± 1	1,6 ± 0,2
Maçaranduba	146 ± 16	13,1 ± 1	2 ± 0,3
Jatobá (Dias et al. 2004)	159	22,9	-
Compósito reforçado por fibras de vidro. Vf= 0.36 (Chacón et al. 2007)	351 ± 5	20 ± 2	-
Compósito reforçado por fibras de vidro envelhecido. Vf= 0.36 (Chacón et al. 2007)	285 ± 55	17 ± 2	-
BLC tratado com água e colado com cascophen (Paes et al. 2009)	89	9.6	

As amostras submetidas a esse tratamento apresentaram curvas tensão-deformação, Figura 27, semelhantes a das amostras sem tratamento. Ou seja, o comportamento foi linear inicialmente, a falha não ocorreu de modo brusco e não houve a separação da amostra em duas peças.

Conforme Tanaami (1986) em uma mesma espécie, a resistência à flexão varia conforme a umidade e a densidade, (Figura 28).

Interpretando o gráfico mostrado na Figura 28 pode-se ver que conforme a umidade aumenta a resistência à flexão diminui. Por outro lado, quanto mais densa for a madeira maior será a resistência à flexão para um dado teor de umidade. Assim, se houver extração de componentes solúveis e portanto, aumento da densidade é possível manter a mesma ordem de grandeza da resistência à flexão, mesmo após imersão do material.

ASTM D790 Flexure Test

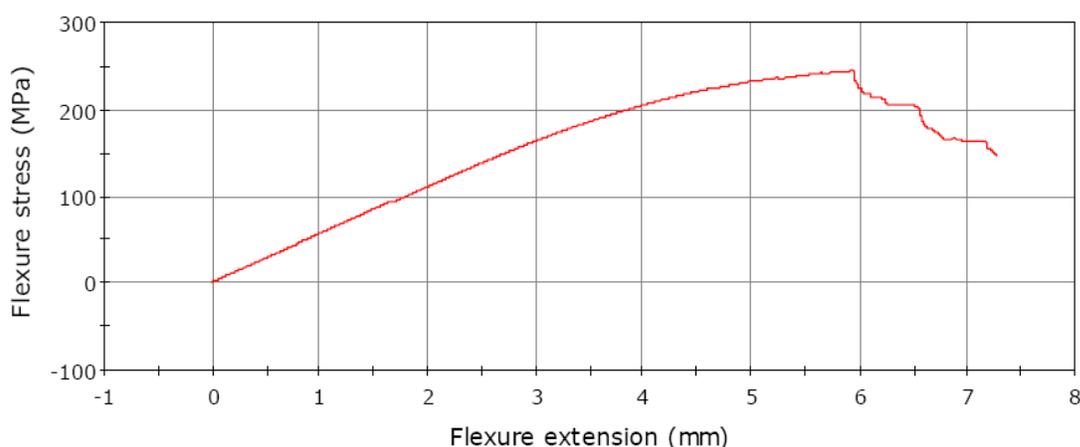


Figura 27 - Curva representativa do comportamento da pupunha após imersão no ensaio de flexão estática.

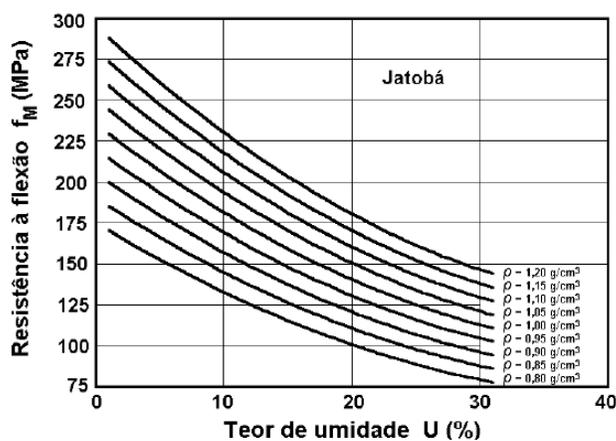


Figura 28 - Influência da umidade e da densidade sobre a resistência à flexão para o jatobá (Tanaami, 1986).

4.4.3 Pupunha envelhecida

Este ensaio foi realizado com o objetivo de verificar os efeitos da exposição ao tempo da pupunha. As amostras foram expostas aos raios UV e a umidade por 3980.48 horas. Conforme pode ser observado na Tabela 2 isso gerou uma redução na resistência. Mesmo assim, os valores obtidos são altos e comparáveis a madeiras como o jatobá e maçaranduba, que não foram submetidas ao ensaio de envelhecimento. Esse ensaio demonstrou que a pupunha além de ter valores de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) em flexão muito altos ainda resiste muito bem à exposição ao tempo. De fato, se forem comparadas as porcentagens médias de redução das propriedades mecânicas da pupunha e de compósitos de fibra de vidro, que foram submetidos ao mesmo ensaio, pode-se observar que o compósito sintético teve uma redução de quase 30% no MOR, enquanto para a pupunha esse valor foi de aproximadamente 10%.

Analisando a Figura 29, pode-se observar que mesmo com esse decréscimo nas propriedades, o comportamento tensão-deflexão foi semelhante, com as amostras não rompendo em duas partes.

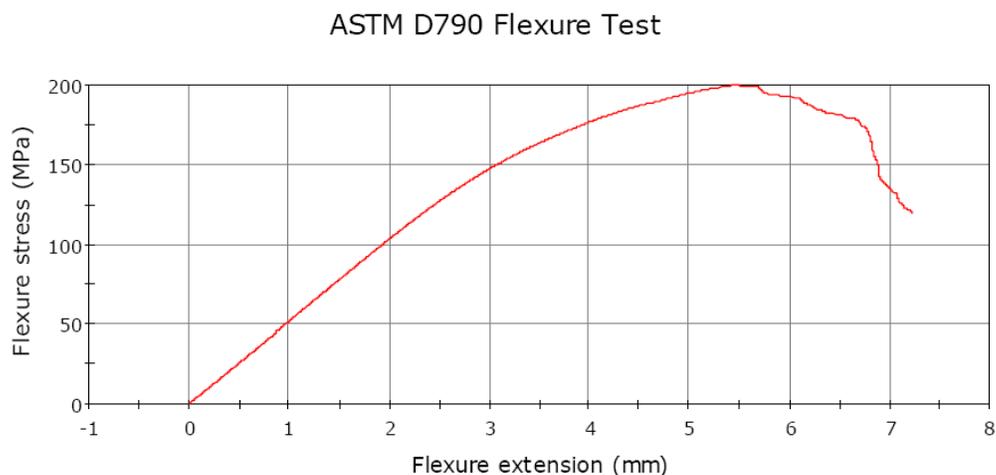


Figura 29 – Comportamento em flexão da pupunha após envelhecimento.

4.4.3.1 Maçaranduba

A curva do ensaio com a maçaranduba foi similar à da pupunha (Figura 30), mas com valores de resistência quase 50% abaixo e desvios padrão mais altos. Portanto é valido reforçar que apesar da maçaranduba ser uma madeira muito utilizada em diversos segmentos, a pupunha obteve valores significativamente mais altos.

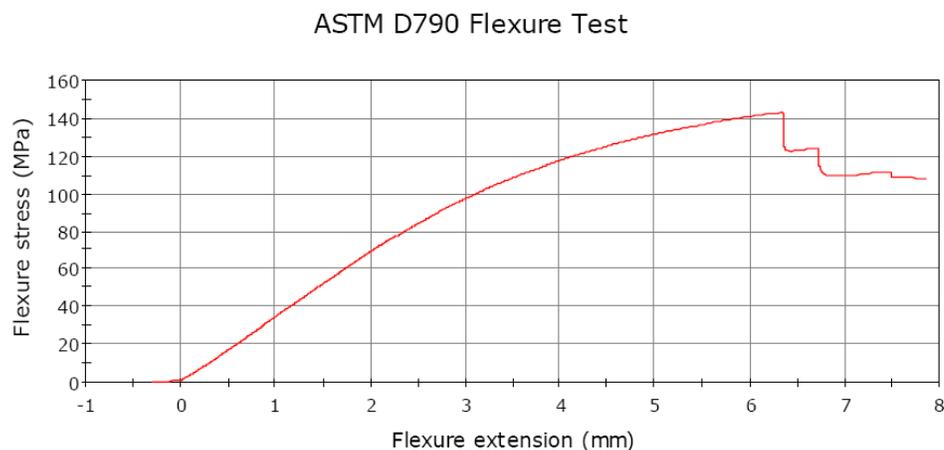


Figura 30 - Curva representativa do comportamento mecânico em flexão da maçaranduba

4.4.4 Coqueiro

O coqueiro também apresentou um comportamento linear do início, porém o valor da tensão de ruptura máximo é quase 3 vezes menor do que o da pupunha (Figura 31). Vale ressaltar que a falha no coqueiro foi menos brusca, havendo, portanto, um grande consumo de energia de deformação pelo material antes de haver uma queda brusca de carga (Figura 31). Deve-se ressaltar, também, que a madeira do coqueiro deve ser comparada com madeiras ditas macias e que pode ser empregada em situações que exijam menores esforços mecânicos.

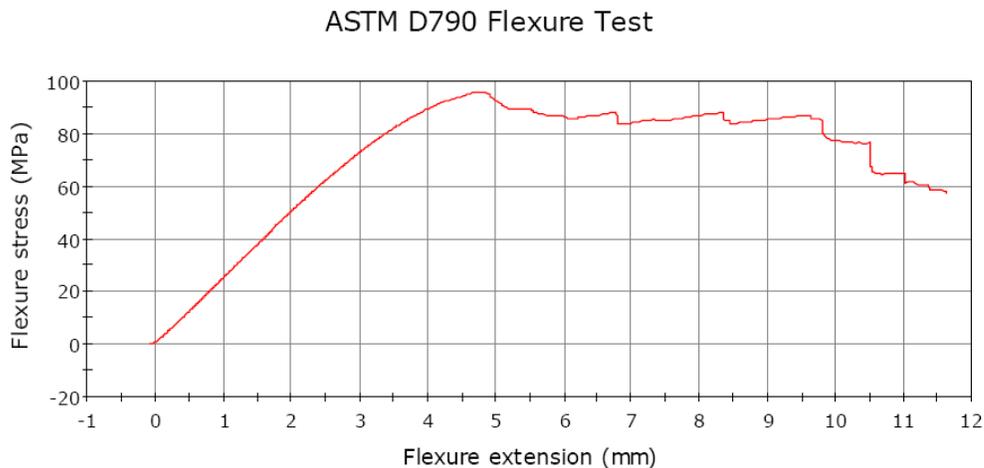


Figura 31 – Típica curva tensão-alongamento em flexão obtida para o coqueiro

Na Tabela 3 está mostrado, entretanto, que as propriedades obtidas são semelhantes a de diversas madeiras normalmente usadas. Deve-se destacar que a madeira do coqueiro é um resíduo e mesmo assim tem características mecânicas equivalentes a madeiras extraídas somente com esse propósito.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de algumas madeiras moles

	Tensão máxima (MPa)	Modulo elástico (GPa)	Deformação (%)
Coqueiro	82,64 ± 11,5	9,66 ± 1,13	2,38 ± 0,47
Angelim amargoso (Dias et al., 2004)	89	14,9	
Angelim pedra (Dias et al., 2004)	84	10,7	
Cedro amargo (Dias et al., 2004)	62	9,1	
Copaíba (Dias et al., 2004)	87	13,5	

4.5 Ensaio de compressão

O ensaio de Compressão paralela às fibras foi realizado apenas com a pupunha sem tratamento e o valor médio obtido está apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades em compressão da pupunha.

	Compressão paralela as fibras MPa
Pupunha	83 ± 0.2
Jatobá (Calil Júnior et al. 2000)	91
Maçaranduba (Calil Júnior et al. 2000)	83
Bambu (blc) Cascophen (Paes et al. 2009)	40,74

Embora esse ensaio seja de fácil execução, os resultados obtidos podem ser afetados por diversos fatores. Segundo Gindl (2002) o parâmetro mais importante para determinar a resistência à compressão é a densidade, seguido pelo ângulo das microfibrilas, que é descrito por Timell (1986) como um importante fator.

Isso ocorre porque quando se comprime a madeira na direção paralela a fibra, pode-se causar dobras na estrutura fibrilar fazendo com que a parte lateral da parede celular flambe (Dinwoodie, 1981). Green (1998), concorda com esse argumento e acrescenta que o módulo de ruptura em compressão em peças curtas é inicialmente caracterizado pelo dobramento das microfibrilas, podendo ocorrer a níveis baixos de tensão e em níveis mais elevados ocorre uma dobra similar na parede celular. Segundo Dietenberger et al, (1999) as falhas por compressão normalmente aparecem na superfície da peça como pequenas linhas brancas ou através de zonas formadas pelo amassamento ou empenamento das células, (Figura 32).



Figura 32 – amostras de compressão após o ensaio.

De acordo com os ensaios conduzidos por Longsdon (1998), a variação da umidade afeta diretamente as propriedades mecânicas de compressão paralela às fibras, fazendo com que a densidade aparente, nesse caso, seja inversamente proporcional ao aumento da resistência.

Portanto levando-se em conta que o ensaio foi conduzido no nível do mar, onde a umidade relativa do ambiente é superior ao padrão estabelecido pela NBR 7190 (1997). Foi preciso usar a equação seguinte recomendada pela norma, para corrigir o teor de umidade: onde: f_{12} é a resistência corrigida para a umidade de 12%, $f_u\%$ é a resistência para umidade $U\%$ e $U\%$ é o teor de umidade.

Ainda segundo a NBR 7190 (1997), para lugares onde a umidade do ambiente varia entre 65% e 75%, a umidade de equilíbrio da madeira é 15%.

Usando a equação da norma, podemos afirmar que a variação de 3% na umidade relativa da madeira, faz com que a resistência varie quase 10%, pois

$$f_{12} = 90,47 \text{ MPa}$$

Ainda segundo a norma NBR 7190 (1997), as madeiras podem ser classificadas em classes de resistências, levando em conta, entre outros fatores, o módulo de elasticidade e de ruptura na compressão paralela às fibras. No caso de não determinação deste módulo de elasticidade, pode-se obtê-lo através da sua relação com o módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão.

As relações desenvolvidas pela norma são para madeiras dicotiledôneas e coníferas, portanto podemos apenas estimar o módulo de elasticidade em compressão para a pupunha. Para as Coníferas temos $E_f = 0,85 E_c$ e para dicotiledônea $E_f = 0,90 E_c$, onde E_f é o módulo de elasticidade em flexão e E_c é o módulo de elasticidade em compressão

Ajustando o valor do módulo de elasticidade em flexão da pupunha para a umidade a 12%, obtemos 22.127 MPa e para o do coqueiro obtemos 10.529 MPa. Corrigindo esses valores com a equação desenvolvida para as dicotiledôneas, o módulo de elasticidade em compressão da pupunha seria 19.914 MPa e do coqueiro 9.476 MPa. Portanto avaliando a Tabela 5, constata-se que a pupunha, mesmo sendo monocotiledônea apresenta valores equivalentes à classe C60, na resistência à compressão e C40, no módulo de elasticidade em compressão. Vale ressaltar que as dicotiledôneas são consideradas madeiras duras e as classes nas quais a pupunha foi enquadrada mostra que ela pode ser usada em estruturas de duração permanente e de longa duração.

Para o coqueiro seria mais adequado compará-lo com as coníferas, já que ele apresenta valores equivalentes a essas. Analisando a Tabela 6, constata-se que o módulo de elasticidade em compressão do coqueiro, 8449 MPa, é próximo da classe C25.

Tabela 5 – Classe de resistência das dicotiledôneas Fonte NBR 7190(1997)

Classes	f_{co}	E_{co}	ρ_{bas}	ρ_{ap}
C20	20	9500	500	650
C30	30	14500	650	800
C40	40	19500	750	950
C60	60	24500	800	1000

Tabela 6 – Classe de resistência das coníferas
Fonte NBR 7190(1997)

Classes	f_{co}	E_{co}	ρ_{bas}	ρ_{ap}
C20	20	3500	400	500
C25	25	8500	450	550
C30	30	14500	500	600

Nas tabelas acima f_{co} é a resistência à compressão (em MPa), E_{co} : módulo de elasticidade em compressão (em MPa), ρ_{bas} :densidade básica em $Kg\ m^{-3}$ e ρ_{ap} : densidade aparente em $Kg\ m^{-3}$.

4.6 Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola

4.6.1 Amostras com 3mm de espessura

Durante o ensaio os corpos de prova colados com Cascophen e Flex gel, não romperam na linha de cola e sim no próprio material, portanto não foi possível determinar a força de ruptura para esses adesivos. Porém os corpos de prova unidos

com as demais colas, sofreram ruptura na linha de cola, indicando que estes adesivos ou são menos resistentes que a resistência inerente ao substrato aderido (pupunha), ou, ainda, que o adesivo não penetrou suficientemente na estrutura anatômica da pupunha, a fim de garantir uma melhor aderência.

A Figura 33 mostra os corpos de prova iniciais, com espessura de 3 mm, que não resistiram ao ensaio de cisalhamento na linha de cola.



Figura 33- Corpos de prova que não romperam na linha de cola com espessura de 3mm

Para essas duas colas Cascophen e Flexgel foram feitas, então, novas amostras com maior espessura

A Tabela 7 mostra os resultados obtidos para os corpos de prova de pupunha com 3mm de espessura que romperam.

Tabela7 - Amostras de pupunha com 3mm de espessura(Unidade – Mpa)

401	Kehl	Cascorex	Imperveg-v	Epoxi
3,74 ± 0,38	5,02 ± 0,47	3,86 ± 0,35	3,03 ± 0,48	2.50 ± 1,7

A análise desses dados será feita ao final desse item (4.6.3)

4.6.2 Amostras com 10mm de espessura

Além das amostras de pupunha, corpos de prova de coqueiro foram fabricados com 10 mm de espessura usando as colas Cascophen e Flexgel, para se comparar o desempenho dos dois materiais. Cabe ressaltar que não foram feitas amostras de coqueiro com 3mm de espessura. Apesar desse aumento de espessura, quatro dentre cinco amostras de coqueiro / Cascophen não romperam na interface, conforme mostrado na Figura 34. Para as amostras pupunha / Cascophen um corpo de prova dentre 5 também não falhou na linha de cola. Apesar da espessura ter sido modificada, a área colada permaneceu a mesma, (8 cm^2) em cada lado. A tabela 8 mostra a média dos resultados validos.

Tabela 8 - Amostras de pupunha e coqueiro com espessura de 10mm (unidade MPa)

Cascophen Pupunha	Cascophen Coqueiro	Flex gel Pupunha	Flex gel Coqueiro
$16,73 \pm 1,6$	8,65 Amostra não resistiu	$7,73 \pm 2,8$	$5,92 \pm 1,09$

Dentre as amostras que romperam, corretamente na linha de cola, podemos afirmar que a penetração da Cascophen foi a mais profunda na madeira, aparentemente fazendo ligações extremamente fortes entre as matrizes(lignina e hemicelulose) das amostras.



Figura 34 Amostras de coqueiro com espessura de 10mm que não resistiram ao ensaio de cisalhamento na linha de cola.

4.6.3 Análise dos resultados

Os resultados obtidos com a pupunha unida com a Cascophen são superiores a diversos outros laminados de madeira colados (MLC) e laminados de bambu colados (BLC) encontrados na literatura. Fato esse que descorda com Dietersberger et al, (1999), que afirma que madeiras com maior densidade têm a ligação interfacial por adesivo mais fracas do que madeiras com densidades menores. Pelo fato das madeiras mais densas terem paredes celulares mais grossas, menos volume de lúmen e maior concentração de extrativos, fatores que teoricamente dificultam a penetração do adesivo. Mas tem-se que levar em conta também o ângulo de molhabilidade da madeira ou o ângulo de contato da cola com a superfície.

De fato os ensaios feitos com bambu laminado colado, segundo Paes et al. (2009), atingiram em média 4,74 MPa. Carrasco et al (1995) reportam 8,69 MPa, Wethyavivorn et al (2003) reportam 7,50 MPa, e Gonçalves et al (2002) acharam 10,00 MPa.

Deve-se destacar que os resultados para o coqueiro / cascophen e pupunha / Flex gel (Tabela 8) também são semelhantes a esses resultados reportados para os laminados de bambu.

Os ensaios feitos com madeira laminada colada também apresentaram números abaixo da pupunha. Serpa et al (2003) apresentou 11,92 MPa para o *Eucalyptus grandis*, 11,42 MPa para *Eucalyptus saligna* e 8,05 MPa para o *Pinus elliottii*. Resultados bem próximos dos apresentados por Brotero (1956): para o *Eucalyptus saligna* (9,5 MPa); por Lima (1983) também para o *Eucalyptus saligna* (15,6 MPa) e por Moreira (1999) para o *Eucalyptus grandis* (9,8 MPa) e o *Eucalyptus saligna* (14,9 MPa).

Através dos resultados apresentados por esses autores, podemos afirmar que a combinação pupunha cascophen é muito resistente, chegando a se comparar a resistência obtida em ensaios de cisalhamento na madeira, feitos por Longsdon (1998). A intenção em comparar ensaios de cisalhamento na linha de cola com

ensaios de cisalhamento na madeira é saber se a interface criada é melhor do que a natural e a partir desse resultado suprir uma carência das palmeiras em relação às dicotiledôneas, que é a área aproveitável do tronco.

Das madeiras ensaiadas por Longsdon (1998) a única com a mesma ordem de grandeza é o jatobá, em vista disso podemos atestar que a ligação interfacial entre pupunha - cascophen é tão resistente quanto a lignina/hemicelulose – celulose do jatobá, conhecida por sua densidade e resistência.

Longsdon 1998 também fez ensaios com as madeiras descritas acima, ensaiadas na linha de cola, de onde podemos reiterar que apesar dos resultados obtidos com as outras colas, terem sido inferiores, colas como kehl e flex gel são equivalentes na resistência ao cisalhamento de madeiras como *Pinus elliottii* 7,95 MPa e *Eucalyptus grandis* 7,24 MPa, resultados esses, obtidos com 12% de umidade.

4.7 Ensaio de abrasão normal à fibra

As amostras de pupunha tiveram um desgaste médio de $9,8\% \pm 0,46$ e as de coqueiro de $19,8\% \pm 2,9$. Esses desgastes, quando comparados a valores obtidos na literatura por Oliveira (2005), para o bambu (20,3%), ipê (12,6%), sucupira (15,7%) e jatobá (23,7%), mostram que a pupunha é superior às madeiras de qualidade.

Constatamos após os ensaios de abrasão, que entre as palmáceas, a que tiver maior densidade terá maior resistência à abrasão.

Oliveira (2005) relacionou a densidade com o desgaste no ensaio de abrasão e mostrou não existir relação para madeiras de famílias diferentes. No caso das palmáceas em questão, a de densidade maior correspondeu a de menor desgaste, no caso a pupunha. Mas se a densidade não for um fator determinante para saber o nível de desgaste, acredita-se ser a organização molecular ou a variação da presença dos constituintes principais, celulose, lignina e hemicelulose, o motivo do desgaste diminuto da pupunha.

4.8 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade da pupunha foi $12,54 \pm 0,17$ enquanto o coqueiro $13,40 \pm 0,18$. Segundo Diätenberger et al, (1999) o teor de umidade da madeira depende da quantidade de vapor d'água ou de água armazenado no lúmen e nas cavidades. E também das moléculas de água que estabelecem ligações químicas entre as paredes celulares. Como a umidade relativa do ar era a mesma para ambas amostras, a diferença dos teores de umidade se deu por diferenças intrínsecas do material. Através dos dados gerados a partir da análise quantitativa do mosaico de ambas amostras, pode-se afirmar que a pupunha tem uma fração volumétrica de fibras maior e, portanto terá, já que ambas são da mesma espécie, maior índice de cristalinidade. Relacionando esse dado com a afirmação feita por Philipp et al., (1988) que a celulose quando cristalina apresenta baixa absorção de água. Podemos concluir que a água que fica armazenada entre as paredes celulares foi menor na pupunha. Devido à alta cristalinidade, a densidade será maior e com isso haverá menos cavidades disponíveis para armazenamento d'água. Mas em contrapartida pelo fato de ter uma fração volumétrica de fibras maior, implica em um maior volume de lúmen para transporte de nutrientes, já que cada fibra axial tem seu duto. Fato esse que explica a pequena diferença no teor de umidade das duas amostras.

4.8.1 Determinação da densidade

A densidade básica da pupunha é $1029,86 \text{ Kg m}^{-3} \pm 18,13$ e do coqueiro é $793,11 \text{ Kg m}^{-3} \pm 18,9$.

Nos ensaios de densidade aparente obteve-se $1202,5 \text{ kg m}^{-3} \pm 18$ para as amostras de pupunha e $956,6 \text{ kg m}^{-3} \pm 36$ para as de coqueiro. Podemos confrontar à resultados citados por Calil Júnior et al. (2000), onde o jatobá apresenta 1074 kg m^{-3} e a maçaranduba 1143 kg m^{-3} , Lobão et al (2004) estudou dois lotes de eucaliptus grandis, a densidade média entre a média dos dois lotes é $727,5 \text{ kg m}^{-3}$.

Através destes ensaios de densidade podemos comparar com as tabelas das classes de resistências das dicotiledôneas (Tabela 5) e das coníferas (Tabela 6) e atestar que a pupunha, como já dito no item 4.5, tem características de madeiras dicotiledôneas da classe C60. O coqueiro fazendo dele o mesmo enquadramento feito no item 4.5, nas classes de resistência das coníferas, ele passa para a classe C30