

Avaliação da Qualidade do Papel Produzido com Fibra de *Acacia* spp.

António Santos*, Ofélia Anjos** e Rogério Simões***

*Bolsheiro de Investigação

***Professor Associado

Universidade da Beira Interior. Rua Marquês d'Avila e Bolama, 6201-001 COVILHÃ

**Professor Adjunto

Escola Superior Agrária de Castelo Branco. Quinta da Senhora de Mércules, Apartado 119, 6001 CASTELO BRANCO

Sumário. Com o presente trabalho pretende-se aprofundar o conhecimento sobre o potencial papelero da madeira de *Acacia melanoxylon* e *Acacia dealbata*. Para efeitos de posicionamento relativo das matérias primas, utilizaram-se aparas industriais de *Eucalyptus globulus*. A transformação da madeira em pasta foi realizada através do processo ao sulfato. O comportamento global das três espécies nos processos de cozimento e branqueamento é semelhante. No entanto, face à amostra de *Eucalyptus globulus* usada, a *Acacia melanoxylon* exhibe um rendimento em pasta ligeiramente superior, o que está de acordo com os teores de lenhina e extractivos das madeiras.

Para avaliar o potencial das pastas branqueadas na produção de papel, estas foram submetidas ao processo de refinação, em PFI, tendo-se obtido suspensões de pastas com resistência à drenagem crescentes. Posteriormente, caracterizou-se a suspensão fibrosa e o potencial papelero. Para o mesmo nível de refinação, os papéis produzidos com fibras de acácia apresentam valores superiores de lisura, índice de tracção e índice de rebentamento. Por outro lado, as fibras da *Eucalyptus globulus* apresentam maior resistência intrínseca e têm potencial para produzir papéis mais resistentes, embora à custa de maior consumo de energia na refinação. Para um dado nível de resistência mecânica, as características ópticas dos papéis são semelhantes.

Palavras-chave: *Acacia melanoxylon*; *Acacia dealbata*; potencial papelero; caracterização das fibras

Evaluation of Paper Quality Produced from Fibre of *Acacia* spp.

Abstract. This study evaluates the paper making potential of *Acacia melanoxylon* and *Acacia dealbata* wood, based on a comparison with *Eucalyptus globulus*. The Pulps were transformed by the sulphate process. In general, all three species exhibited similar performances in the cooking and bleaching processes. However, compared to the *Eucalyptus globulus* chip sample used, *Acacia melanoxylon* had a slightly higher pulp yield. This is in accordance with the lignin and extractives contents of the wood samples.

To test paper making potential, the bleached pulps were submitted to the refining process

in a PFI mill, in order to obtain pulp suspensions with increasing drainage resistance. The fibre characteristics were evaluated and handsheets produced. At a given refining level, paper produced from acacia is smoother and has higher tensile and burst strength indexes. On the other hand, *Eucalyptus globulus* fibres show higher zero-span tensile strength. This means paper can be produced with a higher mechanical resistance, although at the expense of increased energy demand in refining. At a given mechanical strength, optical properties of the paper produced from the three species are similar.

Key words: *Acacia melanoxylon*; *Acacia dealbata*; pulp potential; fibre characteristics

Évaluation de la Qualité du Papier Produit avec de la Fibre d'Acacia spp.

Résumé. Ce travail envisage l'approfondissement de la connaissance du potentiel papetier du bois d'*Acacia melanoxylon* et *Acacia dealbata*. A cette fin nous avons effectué une étude comparative de la qualité productive de la pulpe et du papier de ces deux espèces et de l'*Eucalyptus globulus*. La transformation en pâte a été réalisée selon le procédé au sulfate. Les caractéristiques globales des pâtes des trois espèces pendant les processus de cuisson et blanchiment sont semblables. Cependant, nous avons vérifié que, par rapport à l'échantillon d'*Eucalyptus globulus* utilisé, le bois d'*Acacia melanoxylon* présente un plus grand rendement en pâte, ce qui correspond aux teneurs en lignine et matières extractives des bois.

Pour évaluer le potentiel de production de papier, les différentes pâtes blanchies ont été soumises à un processus de raffinage en moulin PFI, ayant obtenu des suspensions de pâtes avec facilité d'égouttage croissante. Par la suite, la suspension fibreuse et le potentiel papetier ont été caractérisés.

Pour le même niveau de raffinage, les papiers produits avec des fibres d'acacia présentent des valeurs supérieures de lissage, de résistance à la traction et à l'éclatement. Par contre les fibres d'*Eucalyptus globulus* présentent une plus grande résistance intrinsèque et produisent du papier plus résistant cependant, nécessitant une consommation d'énergie supérieure pendant le raffinage. Pour un même niveau de résistance physico-mécanique les propriétés optiques des papiers sont semblables.

Mots clés: *Acacia melanoxylon*; *Acacia dealbata*; potentiel papetier; caractéristiques de fibre

Introdução

No mercado mundial de fibra curta, a pasta branqueada de *E. globulus* ocupa um lugar de destaque, tendo como principal utilização a produção de papéis de impressão e escrita. Porém, a posição da espécie *E. globulus* poderá vir a ser ameaçada pela pasta de *Acacia spp.*, nomeadamente *A. mangium*, proveniente dos países asiáticos (PAAVILAINEN, 2000). O crescente número de plantações com fins industriais, as boas condições ecológicas destas regiões (BALODIS e CLARK, 1998; MATHESON *et al.*, 1998) e a qualidade da fibra (PAAVILAINEN, 2000; FUPING e ELIAS, 2003) constituem

factores que potenciam a utilização desta matéria prima. O elevado número de fibras por grama de pasta, o que confere ao papel boa formação e elevada capacidade de difusão de luz, bem como as elevadas flexibilidade e colapsibilidade das fibras, o que facilita a densificação do papel com baixos consumos específicos de energia na refinação, são os factores subjacentes ao potencial desta matéria prima (PAAVILAINEN, 2000; FUPING e ELIAS, 2003).

Portugal tem boas condições ecológicas para o desenvolvimento de algumas espécies de *Acacia spp.*, existindo alguns povoamentos espontâneos de *A. dealbata*, *A. melanoxylon*, *A. cynophylla* e *A.*

longifolia. Porém, os estudos relacionados com a aptidão papeleira destas espécies são escassos. GIL *et al.* (1999), num estudo preliminar sobre o tema, mostraram que as madeiras de algumas destas espécies apresentam uma boa aptidão para o processo de transformação em pasta crua. O rendimento em pasta, o consumo específico de reagentes no cozimento e o teor de lenhina residual na pasta são semelhantes aos da *E. globulus*. O desempenho papeleiro da pasta crua apresenta-se igualmente promissor. De facto, as amostras de acácia usadas desenvolvem boas propriedades de resistência mecânica a baixos níveis de refinação. Porém, a *E. globulus* exibiu um desempenho superior ao nível da opacidade, para um dado nível de resistência mecânica do papel (GIL *et al.*, 1999).

Na sequência do trabalho anterior, com o presente estudo pretende-se avaliar o desempenho da pasta branca, visto ser esse o estado em que é usada na fabricação de papel de impressão e escrita. Por outro lado, usado as mesmas árvores do estudo de GIL *et al.* (1999), investigou-se o comportamento do material de um nível superior das árvores, com o objectivo de realizar uma análise preliminar sobre a variabilidade dentro da árvore.

Material e métodos

A matéria prima utilizada neste trabalho foi facultada pela Estação Florestal Nacional, sob a forma de rolaria, e correspondia às espécies *A. dealbata* e *A. melanoxylon*, provenientes das Dunas de Mira e Mata Nacional do Camarido, respectivamente. O presente estudo centrou-se sobre o material correspondente ao nível de 70% da altura

total de uma árvore de cada uma das espécies. Num projecto em curso vai alargar-se significativamente a amostragem. A matéria prima, na forma de rolaria, foi transformada em aparas, que foram posteriormente classificadas num sistema de crivos CA300 NORAM da Lorentzen & Wettre, tendo-se utilizado as aparas com espessuras inferiores a 8 mm.

A massa volúmica básica das aparas foi determinada segundo o método Tappi 258 om-94, tendo-se obtido para a *A. dealbata* $0,351 \pm 0,003$ g/cm³ ($\bar{x} \pm \sigma$) e para a *A. melanoxylon* $0,387 \pm 0,007$ g/cm³. Para efeitos de comparação, utilizou-se uma amostra de aparas industriais de *E. globulus*, cuja massa volúmica básica era de $0,536 \pm 0,005$ g/cm³. As aparas crivadas das três espécies foram submetidas ao processo Kraft para a produção das correspondentes pastas cruas. As condições de cozimento foram as seguintes:

- Carga de alcali activo (expresso como NaOH) - 22%;
- Sulfidez - 30%;
- Relação líquido/madeira - 4/1;
- Tempo até à temperatura máxima - 90 min;
- Tempo à temperatura máxima - 120 min;
- Temperatura máxima - 160°C.

As pastas cruas obtidas, após desintegração das aparas e lavagem da pasta, foram submetidas a uma sequência de branqueamento de cinco estágios D₀E₁D₁E₂D₂ (D = dióxido de cloro; E = extracção alcalina).

Para cada uma das espécies, procedeu-se à produção de folhas com os seguintes níveis de refinação: 0, 500, 2500 e 4500 revoluções (rev.), em aparelho PFI.

Após determinação das propriedades morfológicas das fibras na suspensão, foram produzidas folhas e efectuada a sua caracterização em termos estruturais, ópticos e de resistência mecânica. Numa primeira fase do estudo trabalhou-se apenas com as acácias, tendo-se numa fase posterior voltado a produzir outras séries de folhas incluindo de novo a acácia e o eucalipto.

Os resultados experimentais foram explorados através da análise de variância, de acordo com o modelo descrito no Quadro 1, que contempla como origens de variação principais os efeitos fixados das espécies e das revoluções no PFI. Para estudar o efeito da espécie no género *Acacia*, aplicou-se a análise de variância a grupos de 20

folhas de cada espécie, elaborados nos dois períodos acima referidos. Para estender a avaliação ao *Eucalyptus globulus*, procedeu-se à análise de variância com 10 folhas de cada espécie elaboradas no mesmo período.

As características biométricas das fibras das pastas foram determinadas no aparelho Morfi[®], tendo-se determinado o comprimento médio pesado em comprimento, a massa linear, a largura e a curvatura das fibras.

Resultados e discussão

No Quadro 2 estão representados os resultados dos parâmetros de cozimento para cada uma das espécies.

Quadro 1 – Modelo de análise de variância das propriedades das folhas

| Origem da Variação | Graus de Liberdade | Valores Esperados dos Quadrados Médios |
|--------------------|--------------------|--|
| Espécie (E) | (e-1) | $\sigma_f^2 + r f \sigma_E^2$ |
| Refinação (R) | (r-1) | $\sigma_f^2 + e f \sigma_R^2$ |
| E x R | (e-1) (r-1) | $\sigma_f^2 + f \sigma_{ExR}^2$ |
| Resíduo | (f-1) e r | σ_f^2 |

Em que:

σ^2 - estimativa da variância de origem fixa;

e - número de espécies (2 para o primeiro grupo e 3 para o segundo);

r - nível de refinação (4 para cada grupo);

f - número de folhas (20 para o primeiro grupo e 10 para o segundo).

Quadro 2 – Resultados do cozimento para cada espécie

| | <i>Acacia dealbata</i> | <i>Acacia melanoxylon</i> | <i>Eucalyptus globulus</i> |
|---|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Consumo de alcali efectivo, NaOH (%) | 15,6 | 15,1 | 15,2 |
| Índice Kappa | 12,4 | 10,9 | 14,1 |
| Viscosidade intrínseca (cm ³ /g) | 996 | 980 | 956 |
| Rendimento em pasta (%) | 51,2 | 53,2 | 50,5 |
| Incozidos (%) | 0,3 | 0,4 | 0,3 |

As duas espécies do género *Acacia* apresentam valores de rendimento em pasta superiores aos observados para a amostra de *E. globulus* usada como referência, sendo a *A. melanoxylon* a que apresenta o valor mais elevado. Em princípio, estas diferenças ver-se-iam acentuadas caso se fizessem alterações no cozimento das acácias para obter pastas com índice kappa da ordem de 14. O maior rendimento em pasta da amostra de *A. melanoxylon* é consistente com os menores teores de lenhina e extractivos da madeira, nomeadamente face à amostra de *E. globulus*. Os teores de lenhina e extractivos foram de: 18,2 e 3,5; 17,5 e 3,2; 20,0 e 4,7, respectivamente para a *A. dealbata*, *A. melanoxylon* e a *E. globulus*.

Comparando os dados de rendimentos em pasta e total obtidos neste trabalho (amostras do nível de 70% da altura total) com os de GIL *et al.* (1999) para a mesma árvore ao nível da base, onde se obtiveram resultados entre 53,7 e 60,1 de rendimento total, verifica-se uma diminuição dos rendimentos com o nível. Relativamente ao efeito da altura na árvore sobre o rendimento não há completo acordo entre os dados da literatura. No entanto, a tendência geral, para o eucalipto, é um aumento até 10-20%, posterior estabilização até 60% e decréscimo acentuado do rendimento para alturas superiores (MICHELL e SCHIMLECK, 1997). Os resultados obtidos para a acácia estão de acordo com esta tendência, visto que o material usado neste trabalho está na gama dos 70% da altura. Num projecto de investigação em curso espera-se definir esta tendência para as acácias.

O rendimento em pasta da espécie *E. globulus* neste trabalho foi relativamente

baixo. De facto, vários autores referem rendimentos em pasta na gama 52 - 59% (VALENTE *et al.*, 1992; MIRANDA *et al.*, 2003; FRENCH *et al.*, 2000; WIMMER *et al.*, 2002), pelo que o resultado agora obtido não representa o desempenho médio da matéria prima nacional.

O consumo de alcali é semelhante para as três espécies. No entanto, o maior valor é observado para a *A. dealbata* e o inferior para a *A. melanoxylon*. O resultado obtido para a *A. melanoxylon* é consistente com os teores de lenhina e extractivos, que são os mais baixos, e com o seu superior rendimento em pasta.

A pasta de *A. melanoxylon* apresenta um teor de lenhina residual ligeiramente inferior ao exibido pela *A. dealbata* e pelo *E. globulus*. No entanto, a taxa de deslenhificação calculada com base nos teores de lenhina na madeira e na pasta, apresentam valores muito semelhantes, da ordem de 95%.

Os valores das viscosidades das pastas são, em geral, baixos, o que muito provavelmente se ficou a dever às condições de cozimento relativamente severas requeridas pela amostra de madeira de *E. globulus* usada para se produzir uma pasta com índice kappa 14.

As pastas cruas foram submetidas à sequência de branqueamento referida na parte experimental com o duplo objectivo de estudar o comportamento das pastas no processo de branqueamento e de obter pastas isentas de lenhina residual. Obtiveram-se os resultados referidos no Quadro 3. O consumo total de dióxido de cloro, expresso como cloro activo, resultou da aplicação em D₀ de uma carga correspondente a um factor kappa de 0,2 (% cloro activo=0,2 x índice kappa) e de uma carga de 1,6 e 0,6%, respectivamente em D₁ e D₂.

Apesar dos valores de índice kappa das pastas cruas serem diferentes, o que dificulta a análise da resposta das pastas no branqueamento, os dados experimentais não indiciam dificuldades particulares no branqueamento destas espécies de acácia, face ao eucalipto.

Características físicas das fibras na pasta branqueada

Das espécies estudadas, a *A. dealbata* é a que apresenta a largura média de fibra superior, enquanto que a *E. globulus* exibe a largura média inferior (Quadro 4).

O valor do comprimento médio das fibras, ponderado em comprimento, da *A. dealbata* é da ordem dos 0,65 mm, enquanto que a *A. melanoxylon* apresenta um valor médio de 0,67 mm, o

que está dentro da gama dos valores publicados para estas espécies (FURTADO, 1994; GIL *et al.*, 1999; SANTOS *et al.*, 2002). As fibras de *E. globulus* apresentam maior comprimento e menor largura, comparativamente com as acácias.

A espécie *E. globulus* apresenta uma massa linear ligeiramente superior à observada para as espécies de acácias, apesar da sua menor largura média, o que indica uma espessura de parede superior, resultando possivelmente, em menores colapsibilidade e flexibilidade das fibras. As diferentes características das fibras também conduzem a diferentes valores de curvatura média das mesmas. Mesmo entre as acácias, a *A. dealbata* apresenta um valor médio de 6,25%, face aos 5,48% da *A. melanoxylon*.

Quadro 3 – Resultados do branqueamento

| Espécie | Consumo Total de ClO ₂ , Cloro Activo | Consumo Total de NaOH | Brancura ISO, % |
|----------------------------|--|-----------------------|-----------------|
| <i>Acacia dealbata</i> | 4,68 | 1,8 | 86,8 |
| <i>Acacia melanoxylon</i> | 4,38 | 1,8 | 86,0 |
| <i>Eucalyptus globulus</i> | 5,02 | 1,8 | 86,8 |

Quadro 4 – Características biométricas das fibras

| | Rev. | Largura das Fibras (µm) | Comprimento Ponderado em Comprimento (mm) | Massa linear (mg/m) | Curvatura (%) |
|----------------------------|------|-------------------------|---|---------------------|---------------|
| <i>Acacia dealbata</i> | 0 | 18,4 | 0,648 | 0,069 | 7,4 |
| | 500 | 18,2 | 0,663 | 0,074 | 6,8 |
| | 2500 | 18,1 | 0,648 | 0,071 | 5,5 |
| | 4500 | 18,3 | 0,637 | 0,063 | 5,4 |
| <i>Acacia melanoxylon</i> | 0 | 17,5 | 0,658 | 0,073 | 5,7 |
| | 500 | 17,7 | 0,670 | 0,069 | 5,1 |
| | 2500 | 17,5 | 0,670 | 0,074 | 5,5 |
| | 4500 | 17,4 | 0,669 | 0,072 | 5,7 |
| <i>Eucalyptus globulus</i> | 0 | 16,5 | 0,721 | 0,079 | 5,7 |
| | 500 | 16,6 | 0,715 | 0,083 | 5,3 |
| | 2500 | 16,5 | 0,701 | 0,083 | 5,9 |
| | 4500 | 16,6 | 0,685 | 0,080 | 5,9 |

Potencial papeleiro

Na Figura 1 está representada a evolução da resistência à drenagem (avaliada pelo grau Schopper - Riegler) em função do nível de refinação, para as três matérias primas.

As três espécies apresentam evoluções semelhantes, sendo a variação observada essencialmente consequência da refinação. Para além disso, é notória a menor refinabilidade da *E. globulus*, relativamente às acácias, nomeadamente para os níveis de refinação intermédios. Este resultado experimental é expectável face à maior massa linear da fibra da *E. globulus*, aliada à sua menor largura de fibra. Dentro das acácias, as fibras de *A.*

dealbata parecem desenvolver maior resistência à drenagem (maior área específica), particularmente para os níveis intermédios de refinação.

Propriedades estruturais

Na Figura 2 apresenta-se uma das propriedades estruturais mais importantes, a massa volúmica das folhas de papel. Para o mesmo nível de tratamento mecânico, as folhas produzidas com fibra de acácia apresentam valores de massa volúmica superiores aos observados para as folhas de *E. globulus*, o que é explicável com base na menor massa linear e na maior largura das primeiras.

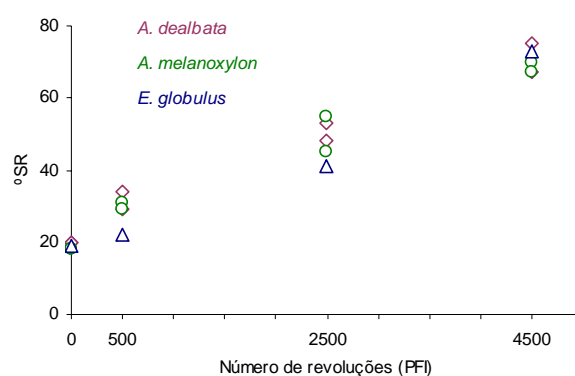


Figura 1 – Variação do grau Schopper - Riegler em função do nível de refinação

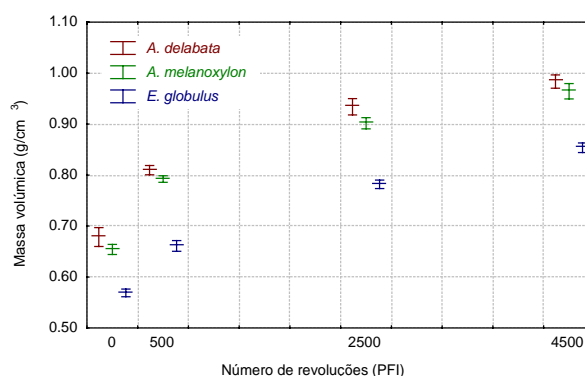


Figura 2 – Variação da massa volúmica das folhas em função do nível de refinação

Dentro das acácias, as folhas de papel da *A. dealbata* apresentam maior massa volúmica média, para os diferentes níveis de refinação. A principal razão para este comportamento deverá ser a sua maior largura de fibra, para uma massa linear comparável, o que conduzirá a maior colapsibilidade da fibra (SANTOS *et al.*, 2004). Para além das diferenças entre as espécies, a Figura 2 evidencia o enorme efeito da refinação sobre a massa volúmica das folhas de papel, o que é consistente com os efeitos da refinação, nomeadamente da fibrilação externa e interna.

A análise de variância (Quadro 5) do lote das acácias, numa primeira fase, e posteriormente do lote que inclui também o eucalipto, confirmou que as variações são essencialmente devidas ao nível de refinação, embora o efeito da espécie seja perfeitamente detectável e com elevado significado estatístico. Na análise estatística do conjunto que inclui as acácias e o eucalipto, o efeito da espécie explica 25,2% da variação total, ficando-se apenas pelos 5,6% quando a análise se restringe às acácias. Este

resultado evidencia a semelhança de comportamento das duas espécies de acácia.

Os valores da resistência à passagem do ar (Figura 3), além de evidenciarem o efeito da refinação, mostram que as folhas produzidas a partir de *E. globulus* são muito mais permeáveis do que as produzidas a partir das duas espécies de acácia, para um determinado nível de refinação. Estes resultados estão de acordo com os observados para a densidade das folhas e as características biométricas das fibras. A maior densidade das folhas revela uma estrutura mais compacta e conseqüentemente menos permeável. Considerando que a uma qualquer massa volúmica corresponde uma determinada porosidade do material, numa primeira análise poderia esperar-se a mesma resistência à passagem do ar para os diferentes materiais. De facto, assim não parece ocorrer, o que deverá merecer a nossa atenção em estudos futuros, embora este comportamento deva estar ligado às diferentes características das fibras.

Quadro 5 - Resumo da análise de variância da densidade das folhas, dos dois lotes de amostras

| | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | F | Sig. | Var (%) |
|---|--------------------|------|--------|--------|------|---------|
| Acácias (20 + 20) | Espécie (E) | 1 | 0,0222 | 125,8 | *** | 5,6 |
| | Refinação (R) | 3 | 0,7436 | 4219,6 | *** | 94,2 |
| | E x R | 3 | 0,0004 | 2,3 | n.s. | 0,0 |
| | Resíduo | 152 | 0,0002 | | | 0,2 |
| Acácias vs eucalipto (10 + 10 + 10) | Espécie (E) | 2 | 0,2413 | 2435,8 | *** | 25,2 |
| | Refinação (R) | 3 | 0,5309 | 5358,5 | *** | 73,9 |
| | E x R | 6 | 0,0012 | 12,0 | *** | 0,5 |
| | Resíduo | 108 | 0,0001 | | | 0,4 |

G.L. - graus de liberdade; Q.M. - Quadrado médio; Sig. - nível de significância; Var (%) - Variância esperada expressa em % da variância total.

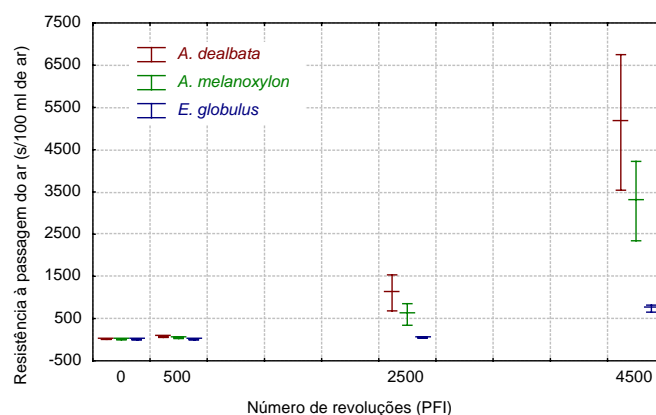


Figura 3 – Variação da resistência à passagem do ar em função do nível de refinação

No Quadro 6 estão representados os resultados das análises de variância correspondentes ao grupo das acácias, por um lado, e ao grupo que inclui as acácias e o eucalipto, por outro. Verifica-se que as variações são essencialmente devidas ao nível de refinação, sendo este efeito superior para o grupo em que se comparam apenas as amostras de pasta de acácia. Para este grupo, a espécie explica 14,4% da variação total, valor ligeiramente superior ao observado quando se comparam as acácias e o eucalipto. Esta diferença é devida ao facto de neste caso a interacção entre a espécie e o nível de refinação (ExR) explicar 25,2% da variação. Isto significa que a variação relativa gerada na permeabilidade ao ar pelos diferentes níveis de refinação é semelhante para as duas espécies de acácia, mas diferente da gerada no eucalipto. Da observação da Figura 3, é notório que as diferenças entre as acácias e o eucalipto são muito elevadas a 4500 revoluções e muito menos significativas para baixos níveis de refinação. Este resultado pode ser explicado pelo maior comprimento e menor colapsibilidade das fibras de

eucalipto, já referido anteriormente.

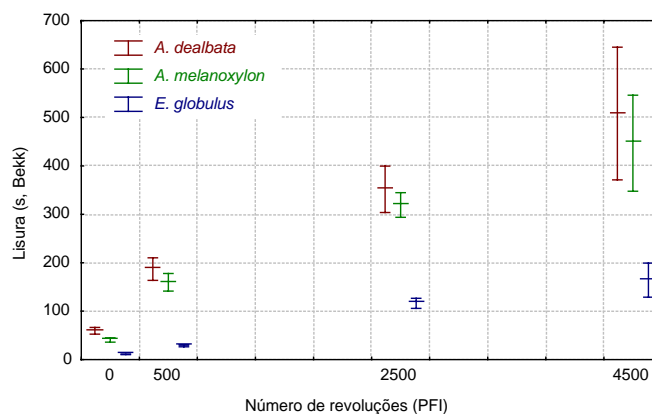
Na Figura 4 apresenta-se a variação da lisura das folhas de papel, para as três espécies. Os resultados revelam que a *A. dealbata* é a que apresenta maior lisura, o que é consistente com a maior densidade das folhas, que por sua vez pode ser atribuída à maior flexibilidade e colapsibilidade das fibras.

Os resultados da análise de variância (Quadro 7), para as duas espécies de acácia, revelam que o nível de refinação é responsável por 91,4% da variação observada, sendo o efeito da espécie muito baixo (5,9%), embora significativo. Quando se comparam as duas espécies de acácia e o eucalipto, verifica-se que a variação atribuída à espécie aumenta significativamente (26,6%). Ao contrário do referido para a permeabilidade ao ar, a interacção ExR é relativamente baixa, o que é compreensível face aos dados da Figura 4. Para além disso, neste grupo de dados regista-se um elevado valor para o resíduo, o que indica a existência de outros factores que afectam a lisura e que não foram contabilizados nesta análise de variância.

Quadro 6 – Resumo da análise de variância da resistência à passagem do ar das folhas, dos dois lotes de amostras

| | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | Fcal | Sig. | Var (%) |
|--|--------------------|------|-----------|--------|------|---------|
| Acácias (20 + 20) | Espécie (E) | 1 | 14500000 | 31,2 | *** | 14,4 |
| | Refinação (R) | 3 | 159000000 | 343,2 | *** | 81,4 |
| | E x R | 3 | 7640000 | 16,5 | *** | 1,8 |
| | Resíduo | 152 | 463321 | | | 2,4 |
| Acácias vs eucalipto (10 + 10 + 10) | Espécie (E) | 2 | 8400000 | 240 | *** | 11,0 |
| | Refinação (R) | 3 | 35400000 | 1011,8 | *** | 62,0 |
| | E x R | 6 | 4810000 | 137,5 | *** | 25,2 |
| | Resíduo | 108 | 35018,8 | | | 1,8 |

G.L. – graus de liberdade; Q.M. – Quadrado médio; Sig. – nível de significância; Var (%) – Variância esperada expressa em % da variância total.

**Figura 4** – Variação da lisura Bekk das folhas de papel em função do nível de refinação**Quadro 7** – Resumo da análise de variância para a lisura das folhas, dos dois lotes de amostras

| | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | Fcal | Sig. | Var (%) |
|--|--------------------|------|---------|-------|------|---------|
| Acácias (20 + 20) | Espécie (E) | 1 | 49147,1 | 12,1 | *** | 5,9 |
| | Refinação (R) | 3 | 1400000 | 343,7 | *** | 91,4 |
| | E x R | 3 | 3326,2 | 0,8 | n.s. | 0,0 |
| | Resíduo | 152 | 4061,2 | | | 2,7 |
| Acácias vs eucalipto (10 + 10 + 10) | Espécie (E) | 2 | 288366 | 133,6 | *** | 26,6 |
| | Refinação (R) | 3 | 467942 | 216,8 | *** | 57,8 |
| | E x R | 6 | 22653,3 | 10,5 | *** | 7,6 |
| | Resíduo | 108 | 2158,2 | | | 8,0 |

G.L. – graus de liberdade; Q.M. – Quadrado médio; Sig. – nível de significância; Var (%) – Variância esperada expressa em % da variância total.

Propriedades físico-mecânicas da pasta

Relativamente às propriedades físico-mecânicas, verifica-se que, para um dado nível de refinação, as características dependentes de forma directa do nível de consolidação da estrutura e do grau de ligação das fibras (índice de tracção, alongamento e índice de rebentamento) são, em geral, inferiores para o eucalipto comparativamente com as duas espécies de acácia. Entre estas, a *A. dealbata* apresenta valores mais elevados, nomeadamente de resistência à tracção (Figura 5). Por outro lado, ao contrário do que ocorre para o eucalipto, em que a resistência à tracção aumenta ao longo de todo o ciclo de refinação, para as acácias assiste-se a uma ligeira perda de resistência para o nível mais elevado de refinação (4500 revoluções no PFI). Este comportamento pode ser explicado pelas características das próprias fibras, nomeadamente pela perda de resistência intrínseca, analisada mais à frente, e eventualmente pela quantidade de fios gerados. Resultados semelhantes foram

observados por COLODOTTE *et al.* (2002) em folhas de *E. grandis* e por SVEDMAN *et al.* (1998) em folhas de algumas espécies de resinosas. Segundo este último autor, a redução do valor do índice de tracção começa-se a verificar a partir de 10000 revoluções em PFI.

No Quadro 8 está representado o resumo da análise de variância do índice de tracção das folhas, para os dois grupos de amostras considerados.

O efeito da espécie no índice de tracção, para os dois grupos de amostras, é altamente significativo, no entanto o efeito do nível de refinação sobrepõe-se a este, explicando a maioria da variação observada (91,9% e 90,5%).

Na Figura 6 representa-se o índice de tracção em função da massa volúmica das folhas de papel, onde sobressai a boa correlação entre a propriedade mecânica e a propriedade estrutural. Outro dado evidente é a superioridade da pasta de *E. globulus*, quando a comparação é feita com base na densidade do papel.

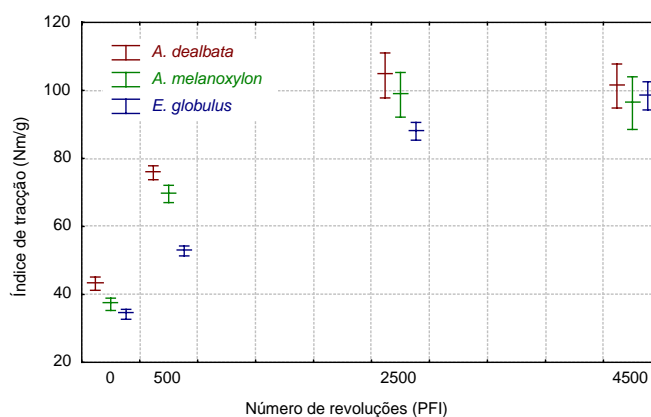
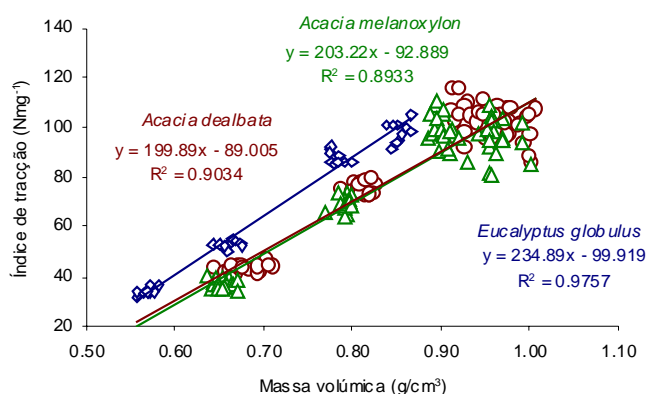


Figura 5 – Variação do índice de tracção em função do nível de refinação

Quadro 8 – Resumo da análise de variância do índice de tracção das folhas, dos dois lotes de amostras

| | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | Fcal | Sig. | Var (%) |
|--|--------------------|------|---------|--------|------|---------|
| Acácias (20 + 20) | Espécie (E) | 1 | 1331,1 | 51,6 | *** | 7,4 |
| | Refinação (R) | 3 | 32671,9 | 1265,7 | *** | 91,9 |
| | E x R | 3 | 2,9 | 0,1 | n.s. | 0,0 |
| | Resíduo | 152 | 25,8 | | | 0,7 |
| Acácias vs eucalipto (10 + 10 + 10) | Espécie (E) | 2 | 1564,8 | 99,3 | *** | 4,5 |
| | Refinação (R) | 3 | 23265,4 | 1477,0 | *** | 90,5 |
| | E x R | 6 | 284,2 | 18,0 | *** | 3,1 |
| | Resíduo | 108 | 15,8 | | | 1,9 |

G.L. - graus de liberdade; Q.M. - Quadrado médio; Sig. - nível de significância; Var (%) - Variância esperada expressa em % da variância total

**Figura 6** – Variação do índice de tracção em função da massa volúmica das folhas

Uma possível explicação para esta observação é a maior resistência intrínseca das fibras e o seu maior comprimento. É também notória a sobreposição das relações correspondentes às duas espécies de acácia, o que é justificável pela semelhança das características biométricas das fibras. Para as acácias, e para o nível de refinação superior, observa-se uma elevada variabilidade, o que pode ficar a dever-se ao aparecimento de pontos fracos nas fibras, onde as tensões se concentram, conduzindo à ruptura prematura do provete de papel.

O parâmetro alongamento (%) está altamente correlacionado ($P < 0,001$), com o valor do índice de tracção para todas as espécies.

Na Figura 7 está representada a evolução do índice de rebentamento com o nível de refinação, verificando-se um crescimento continuado da resistência com o nível de refinação. As fibras de acácia, com maior colapsibilidade, densificam mais rapidamente e desenvolvem resistência com menor consumo de energia na refinação.

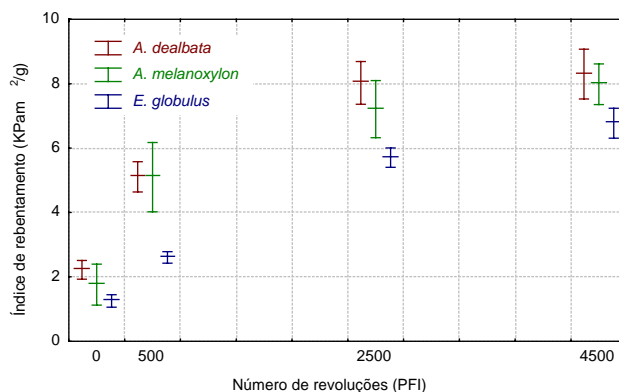


Figura 7 – Variação do índice de rebentamento em função do nível de refinação

A análise de variância da resistência ao rebentamento (Quadro 9) das folhas de papel mostra que o nível de refinação explica 94,9% da variação observada quando as acácias são analisadas separadamente, decrescendo o valor para cerca de 90,3% quando a *E. globulus* é também considerado na análise. As diferenças entre as características das fibras das três espécies, embora altamente significativas, apenas determinam em cerca de 6,4% o índice de rebentamento do papel.

As folhas produzidas a partir das espécies do género *Acacia* apresentam menor resistência ao rasgamento (Figura 8), comparativamente com o eucalipto. O aumento do nível de refinação para além das 2500 revoluções PFI induz uma diminuição desta propriedade, particularmente para as acácias. É de notar ainda a grande variabilidade de valores observados para todos os níveis de refinação.

Ao contrário do verificado para a tracção e o rebentamento, a análise de variância do índice de rasgamento (Quadro 10) revela um importante efeito da espécie e sobretudo da interacção espécie x refinação, particularmente

quando se inclui a espécie *E. globulus* na análise. Este resultado coloca em evidência a resposta diferenciada das fibras de *E. globulus* e de acácias no processo de refinação.

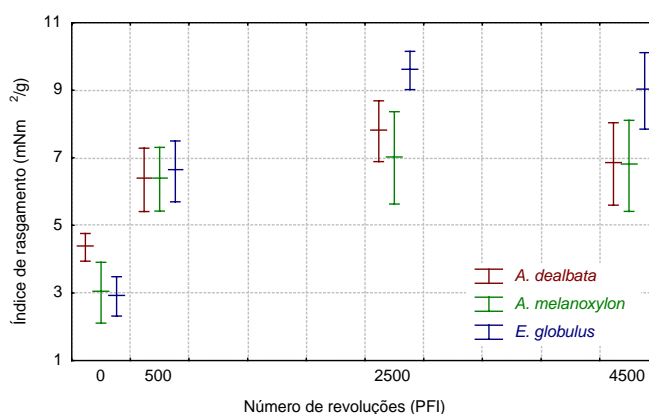
Na Figura 9 representa-se o índice de rasgamento em função do índice de tracção, onde é notório o superior desempenho da *E. globulus*, face às acácias, em termos de resistência mecânica. No entanto, a análise não fica completa sem considerar a interacção da resistência mecânica com a resistência à drenagem.

Na Figura 10 representa-se um índice de resistência mecânica ($\sqrt{\text{índice de tracção} \times \text{índice de rasgamento}}$) em função da resistência à drenagem, medida em termos de °SR. Apesar da relação entre °SR e densidade das folhas ser desfavorável à *E. globulus* (Figura 11), os dados experimentais da resistência mecânica face à drenagem evidenciam uma ligeira superioridade do eucalipto. A superioridade desta pasta, no que diz respeito às resistências mecânicas, fica-se a dever à superior resistência intrínseca das fibras (avaliada pelo índice "zero-span") e ao seu maior comprimento.

Quadro 9 – Resumo da análise de variância do índice de rebentamento das folhas, dos dois lotes de amostras

| | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | Fcal | Sig. | Var (%) |
|--|--------------------|------|-------|--------|------|---------|
| Acácias (20 + 20) | Espécie (E) | 1 | 6,4 | 12,5 | *** | 3,5 |
| | Refinação (R) | 3 | 317,1 | 619,6 | *** | 94,9 |
| | E x R | 3 | 1,1 | 2,2 | n.s. | 0,1 |
| | Resíduo | 152 | 0,5 | | | 1,5 |
| Acácias vs eucalipto (10 + 10 + 10) | Espécie (E) | 2 | 20,8 | 214,3 | *** | 6,4 |
| | Refinação (R) | 3 | 218,1 | 2248,8 | *** | 90,3 |
| | E x R | 6 | 1,7 | 17,9 | *** | 2,1 |
| | Resíduo | 108 | 0,09 | | | 1,2 |

G.L. - graus de liberdade; Q.M. - Quadrado médio; Sig. - nível de significância; Var (%) - Variância esperada expressa em % da variância total.

**Figura 8** – Variação do índice de rasgamento em função do nível de refinação**Quadro 10** – Resumo da análise de variância do índice de rasgamento das folhas, dos dois lotes de amostras

| | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | Fcal | Sig. | Var (%) |
|--|--------------------|------|-------|-------|------|---------|
| Acácias (20 + 20) | Espécie (E) | 1 | 11,8 | 10,8 | *** | 15,3 |
| | Refinação (R) | 3 | 107,4 | 98,4 | *** | 75,8 |
| | E x R | 3 | 4,2 | 3,8 | * | 1,1 |
| | Resíduo | 152 | 1,1 | | | 7,8 |
| Acácias vs Eucalipto (10 + 10 + 10) | Espécie (E) | 2 | 21,4 | 30,2 | *** | 8,4 |
| | Refinação (R) | 3 | 94,7 | 133,7 | *** | 50,8 |
| | E x R | 6 | 18,9 | 26,6 | *** | 29,4 |
| | Resíduo | 108 | 0,7 | | | 11,5 |

G.L. - graus de liberdade; Q.M. - Quadrado médio; Sig. - nível de significância; Var (%) - Variância esperada expressa em % da variância total.

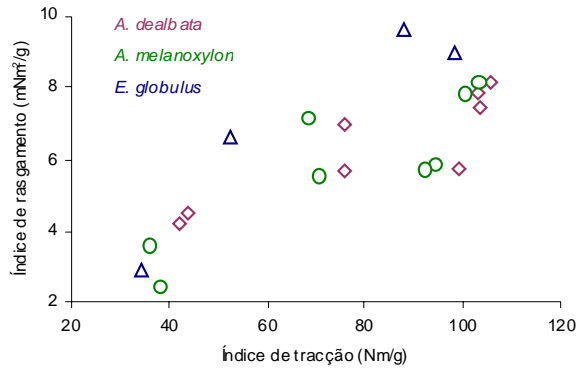


Figura 9 – Índice de rasgamento em função do índice de tracção

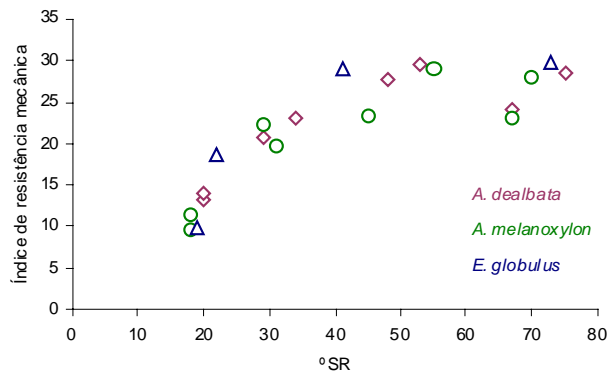


Figura 10 – Resistência mecânica em função da resistência à drenagem

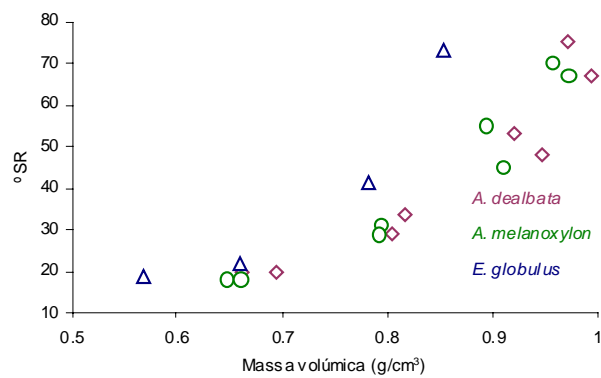


Figura 11 – Resistência à drenagem em função da massa volúmica do papel

Nas Figuras 12 e 13 estão representados os valores médios do índice "zero-span" seco e húmido, e do correspondente desvio padrão, das três espécies em estudo.

A superioridade da espécie *E. globulus* é assinalável, quer para o ensaio em estado seco, quer para o correspondente ensaio em estado húmido. Atendendo a que as viscosidades das pastas (ou os correspondentes graus de polimerização médios viscosimétricos) são semelhantes, uma hipótese explicativa será a existência de menor número de pontos fracos na fibra de *E. globulus*, que apresenta parede mais espessa.

Pela análise de variância dos dados que incluem as três espécies (Quadro 11), verificou-se que a espécie e o nível de refinação, para além de serem ambos altamente significativos, têm um contributo muito elevado para explicar a variação global da resistência das fibras em estado seco e húmido. Contudo, o efeito da espécie é superior para o "zero span" húmido, o que denota uma diferença significativa entre a resistência das fibras da acácia e do eucalipto. No entanto, o valor do resíduo é elevado, denotando a existência de outros factores a afectar a determinação.

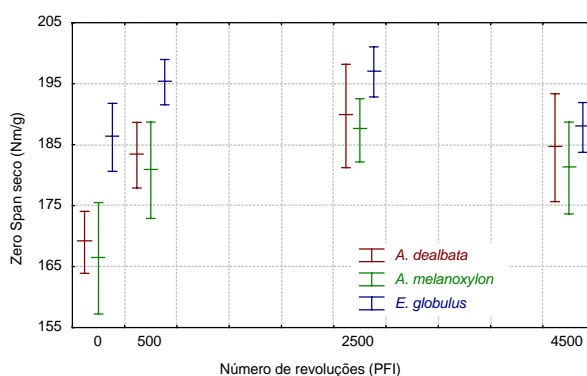


Figura 12 – Variação do "zero span" seco em função do nível de refinação

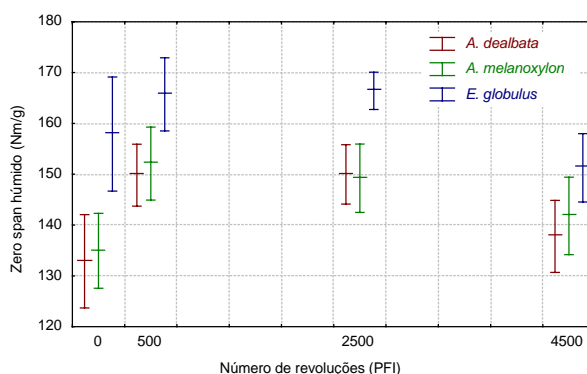


Figura 13 – Variação do "zero span" húmido em função do nível de refinação

Quadro 11 – Resumo da análise de variância do índice "zero span" das folhas, dos dois lotes de amostras

| Acácias vs Eucalipto (10 + 10 + 10) | Origem da Variação | G.L. | Q.M. | Fcal | Sig. | Var (%) |
|--|--------------------|------|--------|-------|------|---------|
| Zero span seco | Espécie (E) | 2 | 3083,7 | 82,5 | *** | 37,9 |
| | Refinação (R) | 3 | 2069,6 | 55,4 | *** | 33,7 |
| | E x R | 6 | 231,5 | 6,2 | *** | 9,8 |
| | Resíduo | 108 | 37,4 | | | 18,6 |
| Zero span húmido | Espécie (E) | 2 | 5393,5 | 128,6 | *** | 52,9 |
| | Refinação (R) | 3 | 1988,2 | 47,4 | *** | 25,7 |
| | E x R | 6 | 162,9 | 3,9 | ** | 4,8 |
| | Resíduo | 108 | 41,9 | | | 16,6 |

G.L. - graus de liberdade; Q.M. - Quadrado médio; Sig. - nível de significância; Var (%) - Variância esperada expressa em % da variância total

Conclusões

No que diz respeito ao processo de transformação da madeira em pasta **crua**, através do processo kraft, a madeira de *A. melanoxylon* testada conduz a maior rendimento em pasta e deslenhifica ligeiramente melhor que as madeiras de *A. dealbata* e de *E. globulus*. Não há diferenças significativas na branqueabilidade das pastas cruas. As características biométricas do material fibroso das pastas de acácias são semelhantes entre si e significativamente diferente da *E. globulus* usada. As primeiras exibem menor massa linear e maior largura, o que lhes confere maiores flexibilidade e colapsibilidade. Por outro lado, são ligeiramente mais curtas.

Em consequência das características das fibras, as pastas de acácia densificam mais rapidamente e em maior extensão no processo de refinação, o que é vantajoso do ponto de vista do consumo específico de energia na refinação e da drenagem. Porém, para uma dada densidade do papel, a *E. globulus* exibe maiores resistências à tracção e ao rasgamento, em consequência da maior

resistência intrínseca das fibras e do seu maior comprimento.

Os dados experimentais obtidos com as amostras usadas neste trabalho colocam as espécies de acácia estudadas em boa posição competitiva quando os níveis de resistência mecânica exigidos ao papel não são muito elevados e a lisura é muito importante. A espécie *E. globulus* ganha vantagem quando há maior exigência ao nível da resistência mecânica. Considerando a elevada variabilidade das madeiras, e das correspondentes características do material fibroso, é necessário alargar o universo da amostragem, o que se está a fazer com um projecto de investigação em curso.

Bibliografia

- BALODIS, V., CLARK, N.B., 1998. Tropical acacia - the new pulpwood. *APPITA Journal* **51**(19): 179-181.
- COLODETTE, J.L., GOMIDE, J.L., GIRARD, R., JÄSKELÄINEN, A., ARGYROPOULOS, D.S., 2002. Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality, and bleachability. *TAPPI Journal* **1**(1): 14-20.

- FRENCH, J., CONN, A., BATCHELOR, W., PARKER A., 2000. The effect of fibre fibril angle on some handsheet mechanical properties. *APPITA Journal* **53**(3) : 210-226.
- FUPING, L., ELIAS, R., 2003. Suitability of Acacia pulp for wood-free coating base papers. *APPITA Conference* pp. 69-74.
- FURTADO, F.P., 1994. Caracterização de Acácias e Estudo da sua Incorporação na Produção de Pasta. *Relatório interno do Instituto de Investigação da Floresta e Papel, Eixo, Aveiro, Portugal*.
- GIL, C., AMARAL, M.E., TAVARES, M., SIMÕES R., 1999. Estudo do potencial papelero da *Acacia spp.* In *Comunicações do 1º Encontro sobre Invasoras lenhosas*, Gerés, 171 pp.
- MATHESON, A.C., HARWOOD, C.E., MICHELL, A.J., 1998. Tropical Australian Acacias. *APPITA Journal* **51**(7) : 261- 265.
- MICHELL A.J., SCHIMLECK L.R., 1997. Variation in wood chemistry and pulp Yield in plantation Eucalypts, in sampling plantation Eucalypts for wood and fibre properties. *CSIRO Publishing, Australia*, pp. 113-115
- MIRANDA, I., TOMÉ, M., PEREIRA., H., 2003. The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globulus* Labill pulpwood. *APPITA Journal* **56**(2) : 140-144.
- PAAVILAINEN, L., 2000. Quality competitiveness of Asian short-fibre raw materials in different paper grades. *Paperi ja Puu - Paper and Timber* **82**(3) : 156-161.
- SANTOS, A., ANJOS, A., SIMÕES, R., 2002. Estudo preliminar sobre o potencial papelero da *Acacia spp.*. In *II Congresso Ibero-Americano de pesquisa e desenvolvimento de produtos florestais, I seminário em tecnologia da madeira e produtos florestais não-madeiráveis*, Curitiba, Brasil, in Cd-room.
- SANTOS, A., ANJOS, A., SIMÕES, R., 2004. Paper making potential of Acacia. (submetido a *APPITA Journal*).
- SVEDMAN, M.; TIKKA, P.; LUHTANEN, M., 1998. Effects of softwood morphology and chip thickness on pulping with a displacement kraft batch process. *Tappi Journal* **81**(7) : 157-168.
- VALENTE, C.A., MENDES DE SOUSA, A.P., FURTADO, F.P., CARVALHO, A.P., 1992. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel: Technological component. *APPITA Journal* **45**(6) : 403-407.
- WIMMER, R., DOWNES, G., EVANS, R., RASMUSSEN, G., FRENCH, J., 2002. Direct effects of wood characteristics on pulp and handsheet properties of *Eucalyptus globulus*. *Holzforschung* **56**(3) : 244-252.

Entregue para publicação em Fevereiro de 2004
Aceite para publicação em Março de 2005