

AS PROPRIEDADES DO PAPEL E AS CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS DE EUCALIPTO

Demuner, B.J.
Vianna Doria, E.L.
Claudio-da-Silva Jr., E.
Manfredi, V.

Aracruz Celulose S.A - Aracruz - ES - Brasil

Resumo

É atualmente bem estabelecido que as propriedades do papel são fortemente relacionadas com as características químicas e anatômicas das fibras. Algumas dessas relações, particularmente para polpas kraft obtidas para um grande número de árvores matrizes e clones híbridos de *Eucalyptus grandis*, são discutidas nesse estudo.

A importância da densidade básica da madeira/flexibilidade das fibras para a qualidade do papel foi mais uma vez claramente identificada. Os resultados também demonstraram que o número de fibras por grama e teor de pentosanas contribuem para uma visão mais completa das relações entre as características das fibras e do papel. Tais resultados possibilitam identificar parâmetros para a seleção florestal e para o controle de qualidade, necessários para a melhoria da qualidade e da uniformidade do papel.

Palavras Chave

Eucalipto, Polpa Kraft Eucalipto, Densidade Básica Madeira, Propriedades Fibras, Número Fibras por Grama, "Coarseness", Pentosanas, Propriedades Papel, Seleção Árvores.

1. Introdução

Os dias em que mais arte que ciência era utilizada na fabricação de papel estão acabando. A enorme disponibilidade de diferentes tipos de matéria prima no mercado proporciona hoje ao fabricante de papel elevado grau de liberdade para atingir a variada demanda para os diversos tipos de papel. Atualmente a ciência e a engenharia da fabricação do papel permitem obter os conhecimentos necessários para o desenvolvimento de tecnologias avançadas e a obtenção de materiais com elevado grau de sofisticação.

Embora o avanço tecnológico para a fabricação de celulose e papel seja significativo, existem lacunas no conhecimento necessário para misturar diferentes tipos de fibras para obter as diversas especificações de papel. Isso é também de interesse particular para os fabricantes de celulose, os quais devem controlar, atualmente, as características das fibras em programas de qualidade assegurada e de seleção de árvores.

A literatura revela muitas informações a esse respeito. Entretanto, algumas vezes os resultados têm uso prático limitado. Um grande número de pesquisas têm sido dedicadas ao estudo do efeito da resistência, espessura da parede celular, largura, comprimento e das relações entre as dimensões das fibras e as características do papel produzido (1-25). Outros estudos se concentram nos efeitos da densidade básica da madeira (22-30) e da flexibilidade das fibras (1,6,31-35).

O efeito significativo da densidade básica da madeira, número de fibras por grama e do teor de pentosanas foi recentemente identificado (36). Naquele estudo o modelo matemático que inclui essas três variáveis foi obtido considerando-se um elevado número de dados da análise de 251 árvores de diferentes espécies e híbridos de eucalipto.

O objetivo desse estudo foi o de verificar a validade do modelo matemático recentemente obtido (36). Utilizou-se um banco de dados obtidos na análise de 144 árvores matrizes e 100 árvores de clones híbridos de *E. grandis*.

2. Informações de Literatura

Muitos estudos têm sido desenvolvidos visando obter uma melhor compreensão das relações entre as características das fibras e as propriedades do papel. A revisão de um grande número de estudos que relacionam as características das fibras com as propriedades do papel para diferentes espécies de madeira (1-25) revela algumas generalizações e também contradições. Tais aspectos são decorrentes, principalmente, do uso de diferentes delineamentos experimentais e, algumas vezes, da aplicação de tratamentos estatísticos inadequados e também o do uso de um número limitado de dados. Outros possíveis fatores para essas discrepâncias podem ser:

- a grande variabilidade natural que ocorre entre espécies, entre árvores de um mesmo gênero e ainda dentro de uma mesma árvore;

- os vários tipos de processos de polpação e as suas diferentes variáveis operacionais;

- a grande variedade de papéis, os quais possuem diferentes demandas de qualidade;

- e ainda a complexidade envolvida na definição e avaliação dos fatores que condicionam as propriedades do papel.

Algumas dessas pesquisas têm tentado estabelecer modelos matemáticos para prever as propriedades do papel a partir

desses modelos anteriores, Page (36) sugeriu estimar a resistência à tração a partir do comprimento, perímetro, densidade, área da secção transversal, tensão de cisalhamento, resistência das fibras e área relativa de ligação das folhas de teste.

Clark(15) tentou simplificar esse modelo, reduzindo o número de variáveis (comprimento, "coarseness", coesividade, resistência das fibras e densidade da folha de teste) e adotando características de maior facilidade de determinação.

Na literatura mais recente, tanto dedicada à elaboração de modelos teóricos (6,23) ou avaliação geral de causa e efeito (8,22), têm sido confirmados os efeitos significativos da espessura da parede celular, comprimento, "coarseness" e da resistência das fibras sobre as características do papel produzido.

Embora a sofisticação experimental e uma abordagem mais científica sejam notadas nos estudos mais recentes, a situação básica do uso limitado de alguns resultados ainda permanece.

Outras tentativas foram, em geral, baseadas no estudo do efeito da densidade básica da madeira como o fator chave para predizer a qualidade do papel (22-30). Os resultados indicam que para as folhosas em geral (8,23,24), e em especial para o eucalipto (14,25-30) existe uma boa relação entre a densidade básica da madeira, flexibilidade de suas fibras, conformabilidade e consolidação da estrutura do papel (1, 6).

Existem evidências de que madeiras com maior densidade básica têm fibras menos flexíveis, devido aos elevados valores de momento de inércia da secção transversal das fibras, em consequência da maior espessura de parede (1). A um mesmo nível de refino, fibras com tais características são mais resistentes à ação de forças de consolidação durante a formação da folha de papel, resultando em papel menos resistente, com estrutura mais aberta, com maior "bulk", porosidade, opacidade e aspereza (rugosidade) da superfície (2,3,25).

Por outro lado, estudos envolvendo fibras de eucalipto com similares valores de flexibilidade e com grande variabilidade natural indicaram que o número de fibras por grama (inversamente proporcional ao "coarseness", o qual por sua vez é influenciado pela espessura, largura e densidade da parede celular das fibras) tem importante contribuição para as propriedades do papel (1,2). Essa propriedade, embora esteja indiretamente incluída em outros modelos (15,37), não foi explicitamente considerada como uma variável fundamental nesses modelos, mesmo sendo independente da flexibilidade das fibras e, atualmente, de fácil determinação.

Mais recentemente, a utilização de um elevado número de dados, obtidos a partir da análise de 251 árvores de diferentes espécies e híbridos de eucalipto (E. grandis, híbridos de E. grandis - polinização aberta, híbridos de

a obtenção de um modelo muito simples para prever as propriedades do papel a partir da densidade básica da madeira, número de fibras por grama e do teor de pentosanas na polpa (36).

A confirmação da validade desse modelo será realizada através da avaliação de um conjunto de dados obtidos a partir de árvores matrizes e clones híbridos de *E. grandis*. Assim, será verificado se esses indivíduos (muito menos diversificados que aqueles utilizados no modelo anterior) conduzem à seleção das mesmas características das fibras.

3. Resultados e Discussão

3.1. Variabilidade dos Dados

As propriedades do papel selecionadas para serem relacionadas com as características das fibras foram o índice de tração, "bulk", resistência ao ar e a aspereza da superfície. Pode ser observado (Tabela 1) que para as 244 árvores analisadas existe uma grande variabilidade natural para as polpas produzidas a um mesmo número kappa = 20 e após tratamento por 1500 revoluções PFI.

TABELA 1 - PROPRIEDADES DO PAPEL - RESULTADOS OBTIDOS PARA 244 ÁRVORES DE EUCALIPTO - APÓS 1500 REVOLUÇÕES PFI.

PROPRIEDADES DO PAPEL	IC	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
ÍNDICE DE TRACÇÃO, N/g	95,4 ± 1,8	54,4	126,7
"BULK", cm ³ /g	1,40 ± 0,02	1,20	1,92
RESISTÊNCIA AO AR, sec/100 ml	26,3 ± 3,4	1,20	129,0
ASPEREZA (RENDISEN), ml/min	103 ± 10	36	93

IC = Intervalo de Confiança (95% de probabilidade).

Uma grande variabilidade natural pode ser observada (Tabela 2) também para as características da madeira e das fibras. A exceção da resistência das fibras, estimada pela medida zero-span, a densidade básica da madeira (411 a 634 kg/m³), o número de fibras por grama (10,2 a 26,5 milhões) e o teor de pentosanas (12,2 a 20,2%) mostraram uma grande variação, o que foi muito útil para a modelagem estatística.

O comprimento médio ponderado para as 244 árvores apresentou também uma variação elevada (0,60 a 1,05 mm), mas nessa avaliação preferiu-se utilizar o número de fibras por grama como variável independente. O número de fibras por grama é também relacionado com o "coarseness" e mais importante que isso, é de mais fácil interpretação física com respeito às ligações das fibras na estrutura do papel.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS - RESULTADOS OBTIDOS PARA 244 ÁRVORES DE EUCALIPTO

CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS	IC	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
DENSIDADE BÁSICA CAVACOS, kg/m ³	507 ± 6	411	634
COMPRIMENTO MÉDIO PONDERADO, mm	0,80 ± 0,01	0,68	1,05
"COARSENESS", mg/100 m	8,0 ± 0,11	6,0	11,5
NÚMERO FIBRAS POR GRAMA, milhão	18,4 ± 0,5	10,2	26,5
ESPESSURA PAREDE CELULAR, µm	2,15 ± 0,05	1,04	3,26
FATOR LUCE	0,37 ± 0,01	0,18	0,52
TEOR PENTOSANAS, %	15,7 ± 0,2	12,2	20,2
ÍNDICE TRACÇÃO ZERO-SPAN, Nm/g	162 ± 0,7	146	184

IC = Intervalo de Confiança (95% de probabilidade).

3.3. Análise Estatística dos Resultados

3.3.1 Detecção de "Outliers" e Multicolinearidade

O objetivo do tratamento estatístico foi o de avaliar possíveis relações matemáticas entre poucas características das fibras (independentes entre si) e as propriedades do papel. Adotou-se a mesma metodologia recentemente proposta (36).

Após a eliminação de "outliers", verificou-se a existência da distribuição normal e da homogeneidade de variâncias. Em seguida pesquisou-se também a existência de correlações múltiplas entre as variáveis independentes (multicolinearidade).

Um dos problemas associados à construção de modelos contendo diversas variáveis independentes é o aparecimento da multicolinearidade, definida como sendo a existência de correlações múltiplas entre as variáveis independentes. Tal fato é devido sobretudo à possibilidade de diversas variáveis do modelo expressarem uma mesma informação.

Embora a sua ocorrência não invalide a utilização da análise de regressão na construção de modelos, a multicolinearidade apresenta a tendência de aumentar a variância dos valores previstos. Como consequência podem ser geradas respostas para valores não incluídos na amostra ou ainda afetar a significância e os sinais dos parâmetros estimados.

A aplicação dos procedimentos estatísticos "R-Square" e Análise dos Componentes Principais (ACP) do "Statistical Analysis System" - SAS (38) permitiu identificar a existência de multicolinearidade entre a densidade básica da madeira, a espessura da parede celular e o fator Luce (39), bem como entre o comprimento, "coarseness" e o número de fibras por grama.

A densidade básica dos cavacos, um dos parâmetros chave da seleção florestal, foi escolhida em função da sua estreita relação com a flexibilidade das fibras e as propriedades do papel (1,6). O número de fibras por grama foi selecionado em função das razões citadas anteriormente.

A análise estatística não revelou uma correlação significativa entre a densidade básica da madeira, a resistência das fibras, medida pelo índice de tração zero-span, o teor de pentosanas e o número de fibras por grama. Dessa forma, parece ser evidente que essas variáveis podem oferecer a melhor possibilidade para definir os principais parâmetros que contribuem para as propriedades do papel. Os resultados indicaram também que essas características das fibras não apresentam diferenças significativas entre as idades consideradas dos clones. Isso foi comprovado estatisticamente, ao nível de 99,99%.

3.3.2. Modelos de Regressão - Propriedades do Papel vs Características das Fibras

A construção de modelos de regressão envolve a seleção de um sub conjunto de variáveis que melhor se ajuste a um modelo linear, produzindo o maior coeficiente de determinação (R^2). A utilização de procedimento estatístico "R-Square" - SAS (38), permitiu obter o melhor conjunto de variáveis no modelo.

Os resultados indicaram que a densidade básica, o número de fibras por grama e o teor de pentosanas foram os parâmetros que contribuíram significativamente (ao nível de 99,99%) para o desenvolvimento das propriedades do papel avaliadas (Tabela 3).

TABELA 3 - REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS - PROPRIEDADES PAPEL vs DENSIDADE BÁSICA MADEIRA E CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS - RESULTADOS PARA 244 ÁRVORES DE EUCALIPTO (MATRIZES E CLONES) - APÓS 1500 REVOLUÇÕES PFI (COEFICIENTES REGRESSÃO PARA O MELHOR AJUSTE PARA CADA PROPRIEDADE SÃO APRESENTADOS NA TABELA 4)

PROPRIEDADES PAPEL	CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS	R^2	F
ÍNDICE DE TRACÇÃO	-DB	0,48	224
	-DB + PE	0,58	170
	a - bDB + cPE + dNF	0,64	144
"BULK"	+DB	0,62	389
	+DB - NF	0,71	291
	a + bDB - cNF - dPE	0,72	211
ln(RESISTÊNCIA AR)	-DB	0,61	382
	-DB + PE	0,68	356
	a - bDB + cPE + dNF	0,72	203
ln(CASPEREZA)	-NF	0,53	274
	-NF + DB	0,67	247
	a - bNF + cDB - dPE	0,70	188

DB=Densidade Básica Cavacos (Variação 411 a 634 kg/m³).
 NF=Número de Fibras por Grama (Variação 10,2 a 26,5 milhão).
 PE=Pentosanas na Polpa (Variação 12,2 a 20,2 %).

TABELA 4 - COEFICIENTES DE REGRESSÃO PARA O MELHOR AJUSTE DE CADA PROPRIEDADE, DESCRITO NA TABELA 3.

PROPRIEDADES PAPEL	COEFICIENTES REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA			
	a	b	c	d
ÍNDICE DE TRACÇÃO	101,90	- 0,1566	+ 3,0016	+ 1,39x10 ⁻⁴
"BULK"	1,02	+ 0,0017	- 1,27x10 ⁻⁶	- 0,0146
ln(RESISTÊNCIA AR)	5,89	- 0,00147	+ 0,1774	+ 8,28x10 ⁻⁶
ln(ASPEREZA)	4,18	- 6,50x10 ⁻⁶	+ 0,0052	- 0,0737

A densidade básica da madeira apresentou a maior contribuição para a variação das propriedades do papel, conforme indicada pelo valor de R² (48 a 62%), à exceção da aspereza do papel, onde o número de fibras por grama foi o principal fator (R² = 53% contra apenas 14% para a densidade básica) (Tabela 3). Esse resultado foi diferente daquele recentemente observado (36), onde a densidade básica foi o principal fator para as quatro propriedades do papel. Tal fato, manifestando-se em um universo constituído somente de indivíduos híbridos de *E. grandis*, permitiu a maior expressão do número de fibras por grama, confirmando a sua importância para a qualidade do papel.

Nos casos onde a densidade básica é o principal fator, a inclusão do teor de pentosanas apresentou contribuição de até 10% para a explicação das variações do índice de tração e da resistência ao ar. Para o "bulk", onde a densidade básica também é o principal fator, o número de fibras por grama é o segundo fator para a explicação do modelo, com contribuição de 9%.

Independentemente da ordem de contribuição da densidade básica da madeira, do número de fibras por grama e do teor de pentosanas, os modelos explicam até 72% das variações das propriedades do papel. Para um modelo de regressão linear simples, obtido a partir de dados com grande variabilidade natural, o grau de explicação obtido é muito satisfatório.

Esses resultados quando comparados com aqueles obtidos, seguindo a mesma metodologia, para um universo muito mais diversificado (diferentes espécies e híbridos de eucalipto) (36), mostra que as variáveis que explicam as propriedades do papel são as mesmas: densidade básica dos cavacos, número de fibras por grama e teor de pentosanas. Essa comparação revela também semelhantes níveis de explicação (R²) e de significância (F), ainda que possam haver variações na ordem de contribuição, sobretudo para o segundo fator (Tabelas 3 e 5).

TABELA 5 - REGRESSÕES LINEARES MÚLTIPLAS - PROPRIEDADES PAPEL vs DENSIDADE BÁSICA CAVACOS E CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS - RESULTADOS PARA 251 ÁRVORES DE EUCALIPTO (DIFERENTES ESPÉCIES E HÍBRIDOS) - APÓS 1500 REVOLUÇÕES PFI (36).

PROPRIEDADES PAPEL	CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS	R ²	F
ÍNDICE DE TRACÇÃO	-DB	0,60	378
	-DB + NF	0,65	229
	a - bDB + cNF + dPE	0,68	178
"BULK"	+DB	0,74	733
	+DB - NF	0,78	449
	a + bDB - cNF - dPE	0,80	341
ln(RESISTÊNCIA AR)	-DB	0,50	251
	-DB + NF	0,59	179
	a - bDB + cNF + dPE	0,60	125
ln(ASPEREZA)	+DB	0,61	395
	+DB - NF	0,71	303
	a + bDB - cNF - dPE	0,74	236

DB=Densidade Básica Cavacos (Variação 414 a 693 kg/m³).
 NF=Número de Fibras por Grama (Variação 11,2 a 25,1 milhão).
 PE=Pentosananas na Polpa (Variação 12,2 a 19,2 %).

Todos os Resultados são Significativos a 99,99%

3.5. Fundamentação das Relações Obtidas

3.5.1. Densidade Básica da Madeira

Conforme também indicado em outros modelos (25-30) a densidade básica da madeira foi matematicamente responsável pela maioria das variações nas propriedades do papel. Isso era de certa forma esperado através da observação das Figuras 1 a 4, onde são ilustrados os dados obtidos para polpas de laboratório, após 1500 revoluções PFI. Embora a densidade básica da madeira seja fortemente influenciada por outras características químicas e anatômicas (30), ela é estreitamente relacionada com a espessura da parede celular.

Fibras com parede mais espessa (madeiras com maiores valores de densidade básica) produzem papéis com estrutura mais aberta, com maiores valores de "bulk", de opacidade e de aspereza superficial, a um mesmo nível de refino. Essas características têm efeito significativo sobre as propriedades de resistência do papel, principalmente aquelas que dependem fundamentalmente do número e da resistência das ligações entre as fibras.

Em outras palavras, a grande contribuição da densidade básica para as variações nas propriedades do papel é devida, principalmente, à sua estreita relação com a flexibilidade

Figura 1
 ÍNDICE DE TRAÇÃO VS DENSIDADE BÁSICA MADEIRA
 1500 REVOLUÇÕES PFI

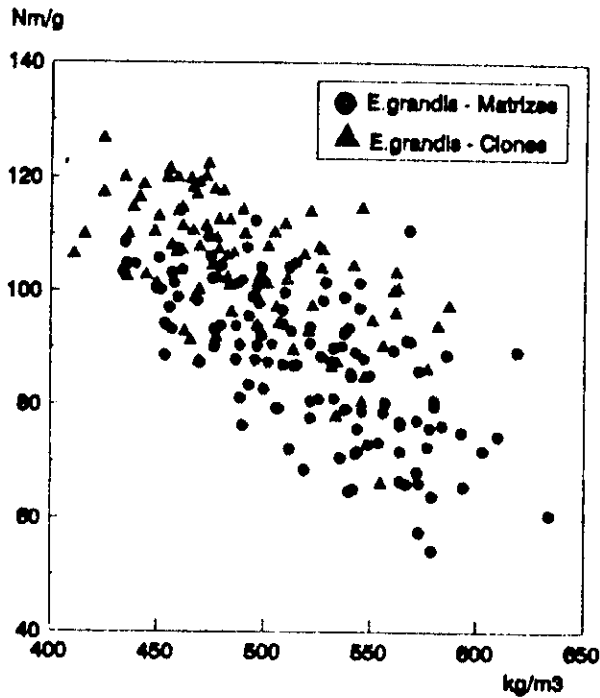


Figura 2
 BULK VS DENSIDADE BÁSICA MADEIRA
 1500 REVOLUÇÕES PFI

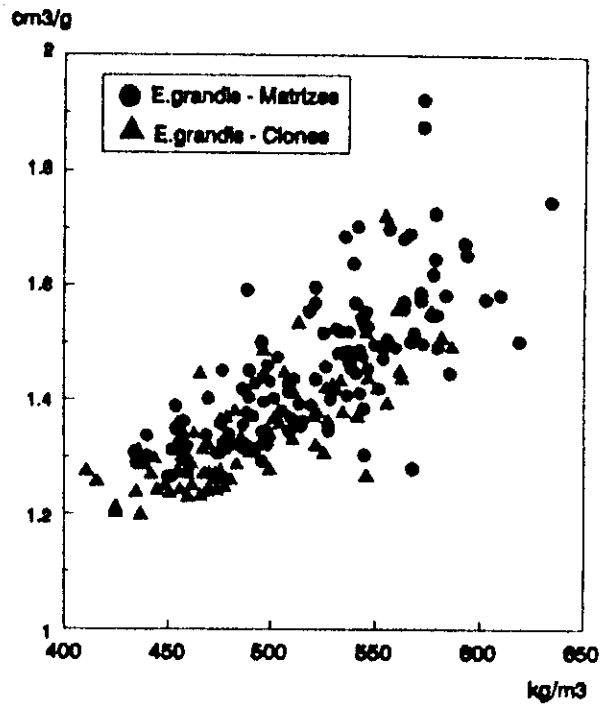


Figura 3
 ln (RESISTÊNCIA AR) VS DENSIDADE BÁSICA MADEIRA
 1500 REVOLUÇÕES PFI

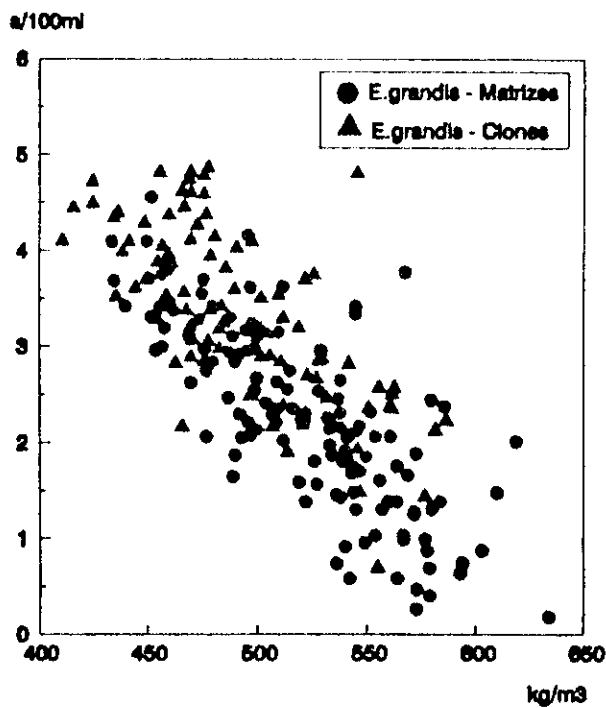
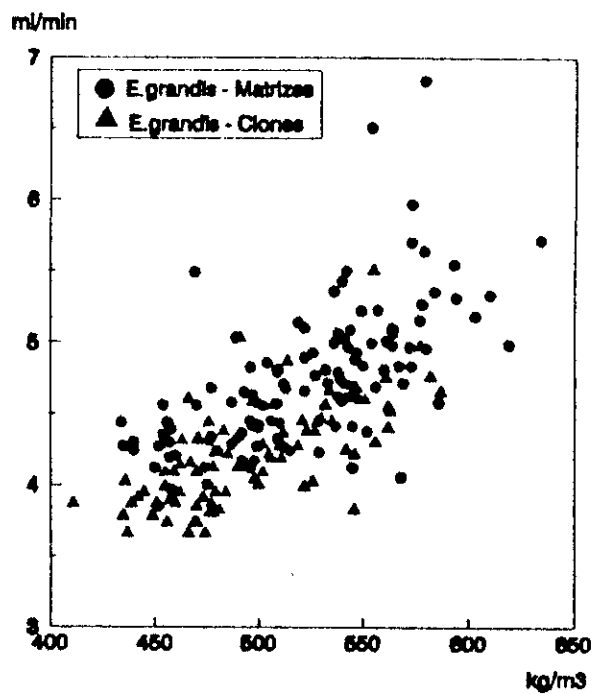


Figura 4
 ln (RUGOSIDADE) VS DENSIDADE BÁSICA MADEIRA
 1500 REVOLUÇÕES PFI



das fibras. Assim, esse aspecto é de grande interesse para a seleção de árvores, desde que a densidade básica possa ser controlada em programas de melhoramento genético.

3.5.2. Número de Fibras por Grama

Embora os dados das figuras 1 a 4 indiquem claramente que a flexibilidade das fibras tem um maior impacto sobre a maioria das propriedades do papel avaliadas, a dispersão dos dados pode ser reduzida se outras características das fibras que também afetam as ligações entre as fibras forem consideradas no modelo. Uma outra propriedade das fibras que é também fácil de medir, varia consideravelmente e é possível de ser afetada em um programa de seleção é o comprimento das fibras.

Muitos estudos têm relacionado o efeito do comprimento das fibras com o desenvolvimento das propriedades do papel (1-25). Entretanto, o maior desafio tem sido isolar o efeito da flexibilidade das fibras, a qual encontra-se estreitamente relacionada com a densidade básica da madeira. Um grande número de experimentos têm sido especificamente delineados com esse objetivo.

Um desses, relaciona-se com o cozimento e o branqueamento de cavacos do cerne e do alburno separadamente, para diferentes árvores (2). Nesse estudo os valores das medidas da seção transversal das fibras foram essencialmente os mesmos, para ambas os tipos de madeiras selecionadas em cada árvore, entretanto o comprimento das fibras foi consideravelmente diferente.

Os resultados da Tabela 6 indicam que folhas de teste com maior "bulk", maior porosidade e com menor opacidade foram obtidas a partir de fibras mais longas e com similares valores de flexibilidade (estimada pelo fator Luce ou pelo momento de inércia).

TABELA 6 - POLPAS BRANQUEADAS DE EUCALIPTO (MESMA ÁRVORE E DE LABORATÓRIO) - INFLUÊNCIA DAS FIBRAS SOBRE AS PROPRIEDADES DO PAPEL - FOLHAS DE LABORATÓRIO - SEM MOAGEK(2).

CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS E DO PAPEL	FIBRAS CERNE	FIBRAS CERNE + ALBURNO (MISTURA 40/60 %)	FIBRAS ALBURNO
MOMENTO DE INÉRCIA-SEÇÃO TRANSVERSAL, μm^4	1851	1613	1577
FATOR LUCE	0,59	0,58	0,57
COMPRIMENTO MÉDIO PONDERADO, mm	0,85	0,74	0,64
NÚMERO FIBRAS POR GRAMA, milhão	16,7	21,6	27,2
ÍNDICE DE TRACÇÃO, Nm/g	35,9	40,6	43,3
RESISTÊNCIA AO AR - GURLEY, s/100 ml	1,03	2,16	3,84
DENSIDADE APARENTE, kg/m ³	574	615	662
COEFICIENTE ESPALHAMENTO LUZ, g ^m /kg	38,5	41,4	44,0

Em um outro experimento, polpas de eucalipto obtidas de diferentes árvores foram analisadas (3). Novamente, o comprimento médio das fibras foi a principal variável, e as conclusões foram basicamente as mesmas (Tabela 7).

TABELA 7 - POLPAS BRANQUEADAS DE EUCALIPTO (OBTIDAS EM LABORATÓRIO) - COMPRIMENTO DAS FIBRAS VS PROPRIEDADES DAS FOLHAS DE PAPEL - APÓS 1500 REVOLUÇÕES PFI (3).

CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS E DO PAPEL	POLPA A	POLPA B	POLPA C
COMPRIMENTO MÉDIO PONDERADO, μ m	0,60	0,63	0,66
"COARSENESS", μ g/100 μ m	8,2	8,2	8,5
NÚMERO FIBRAS POR GRAMA, milhão	21,7	20,5	16,5
ÍNDICE DE TRACÇÃO, Nm/g	62,7	58,8	52,4
RESISTÊNCIA AO AR -GURLEY, s/100 μ m	18,6	7,5	5,2
"BULK", cm^3/g	1,44	1,53	1,58
COEFICIENTE ESPALHAMENTO LUZ, m^2/kg	41,2	37,8	36,2

Quando plotados contra a densidade básica da madeira, pode ser observado que o comprimento e o "coarseness" das fibras nesse estudo (dependente da espessura e da densidade da parede celular) apresentam-se fracamente relacionados com a densidade básica (Figuras 5 e 6), o que foi também confirmado anteriormente na análise de multicolinearidade. Esses aspectos quando associados com os resultados apresentados nas tabelas 6 e 7 indicam que o comprimento e o "coarseness" das fibras devem ter efeito significativos sobre a consolidação do papel e, conseqüentemente, sobre as suas propriedades, independentemente da flexibilidade das fibras.

O número de fibras por grama é uma variável composta, derivada do inverso do produto do comprimento médio pelo "coarseness" das fibras. A seleção dessa propriedade como uma variável independente no modelo matemático foi baseada nas suas possíveis implicações físicas sobre a consolidação e as propriedades do papel. A probabilidade e conseqüentemente o número de ligações entre fibras deve ser diretamente proporcional ao número de fibras por unidade de massa do papel.

Através das derivações feitas por Kallmes & Corte (40-42), o número total de ligações entre fibras (NC), para uma estrutura aleatória, com comprimento de fibras, gramatura e área da folha constantes, é esperado ser proporcional ao número de fibras por unidade de massa (NF), ou seja:

$$NC \propto (NF)^2$$

Conseqüentemente, espera-se obter uma estrutura de papel mais aberta, com maior grau de consolidação (e então de ligação) e um maior número de interfaces fibra-ar com mais fibras por grama na folha de papel.

Os resultados ilustrados nas Figuras 7 a 10 demonstram claramente que uma maior consolidação da folha de papel pode ser esperada com maior número de fibras por grama na sua estrutura, conforme também indicado em outros estudos (40-42). Isso resulta na obtenção de uma folha mais resistente e, principalmente, com superfície mais lisa (maior valor de explicação do modelo - Tabela 3), com menor "bulk" e

Figura 5
COARSENESS VS DENSIDADE BÁSICA MADEIRA

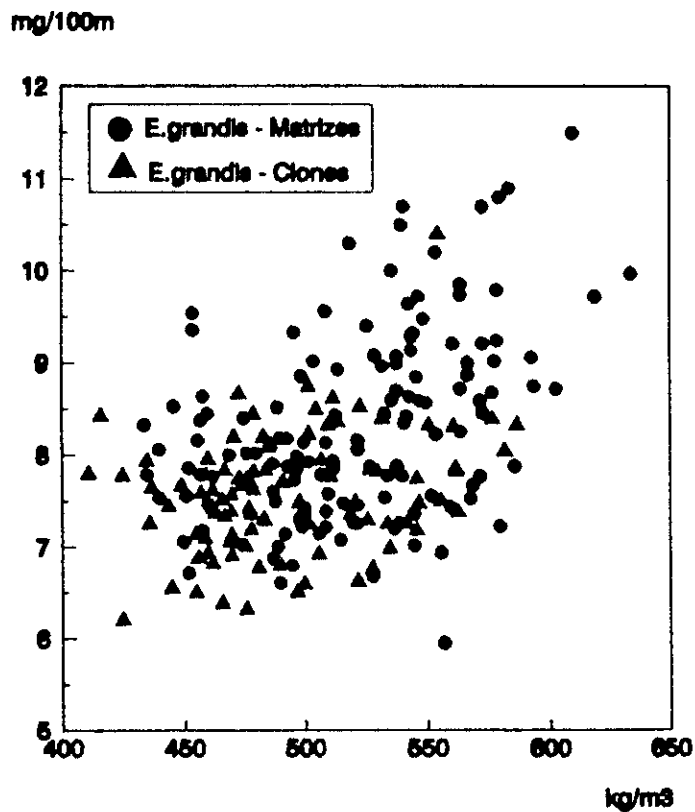


Figura 6
COMPRIMENTO MÉDIO VS DENSIDADE BÁSICA MADEIRA

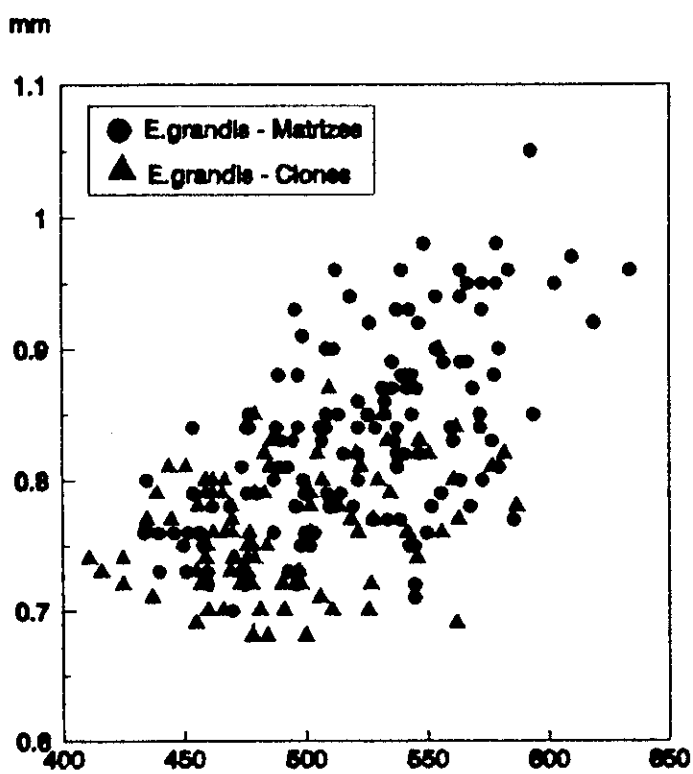


Figura 7
 ÍNDICE DE TRAÇÃO VS NÚMERO FIBRAS POR GRAMA
 1500 REVOLUÇÕES PFI

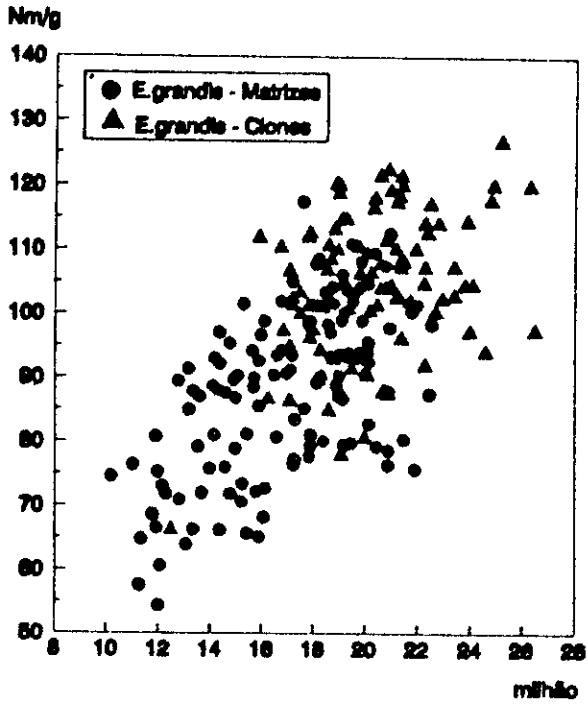


Figura 8
 BULK VS NÚMERO FIBRAS POR GRAMA
 1500 REVOLUÇÕES PFI

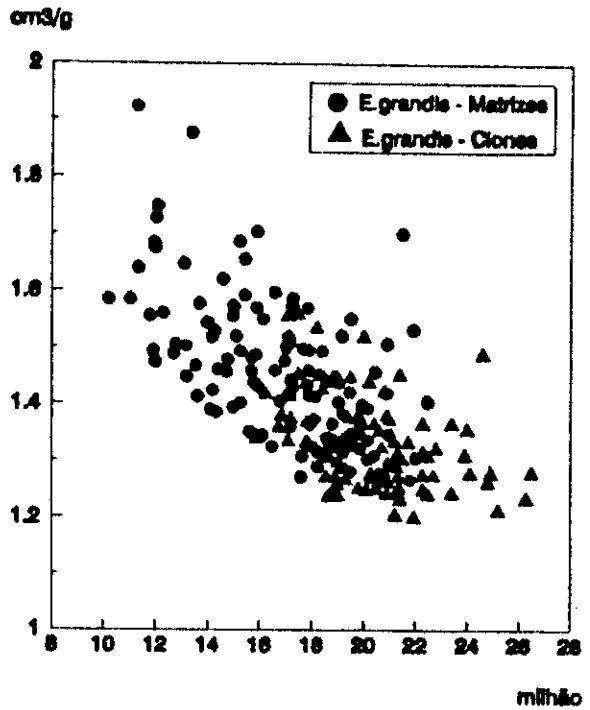


Figura 9
 ln (RESISTÊNCIA AR) VS NÚMERO FIBRAS POR GRAMA
 1500 REVOLUÇÕES PFI

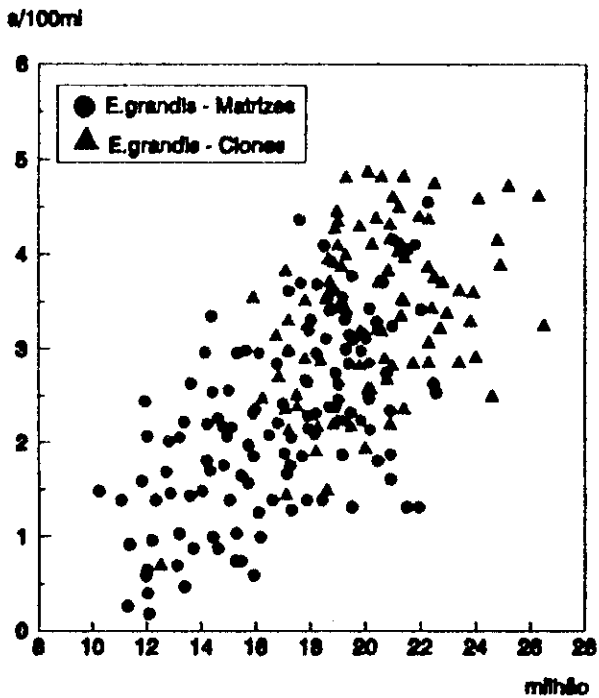
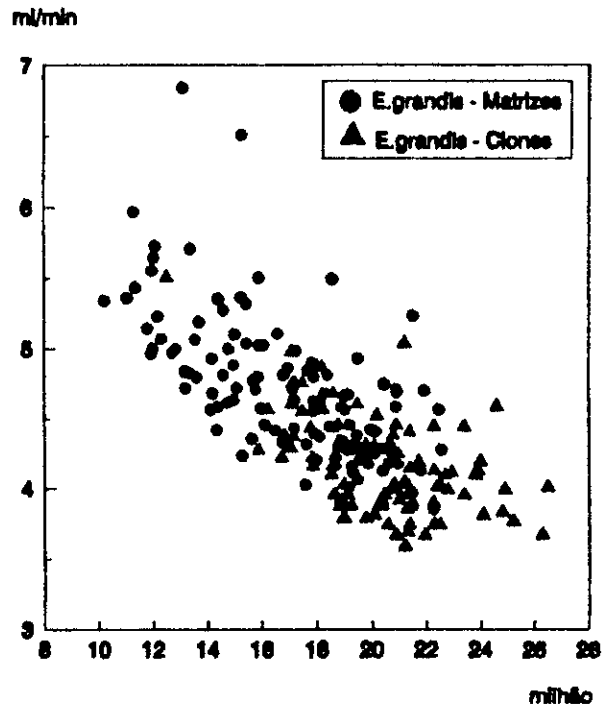


Figura 10
 ln (RUGOSIDADE) VS NÚMERO FIBRAS POR GRAMA
 1500 REVOLUÇÕES PFI



essas folhas têm também maior opacidade que aquelas obtidas com menor número de fibras por unidade de massa (Tabelas 6 e 7).

Os resultados indicam também que a relação entre as propriedades do papel e o número de fibras por grama é linear simples e não do tipo (NF)², conforme indicado pelos cálculos do modelo de Kallmes & Corte. Isso foi confirmado estatisticamente.

Sendo independente da flexibilidade das fibras, e também facilmente medida e possível de ser controlado geneticamente, a inclusão do número de fibras por grama no modelo para prever as propriedades do papel deverá contribuir com significativas interpretações práticas de alguns fenômenos na fabricação de papel, assim como para um melhor controle da matéria prima.

3.5.3. Pentosanas na Polpa

As hemiceluloses são críticas para a fabricação de papel. Polpas com baixo teor de hemiceluloses podem dificultar o refino e a flexibilização das fibras. Além disso, o número e a resistência das ligações entre as fibras são influenciadas pelas hemiceluloses. Particularmente para polpas kraft branqueadas de eucalipto, cujas hemiceluloses são constituídas basicamente por xilanas (43), a importância das hemiceluloses para o desenvolvimento das propriedades do papel tem sido citada em vários trabalhos (15,44-46).

Os resultados obtidos nesse estudo, para diferentes matrizes e clones híbridos de eucalipto (teor de xilanas entre 12,2 a 20,2%) indicam que o teor de pentosanas afeta significativamente as propriedades do papel, conforme ilustrado nas Figuras 11 a 14. Essa contribuição foi confirmada pelos valores de R² e de F quando o teor de pentosanas foi considerado no modelo linear (Tabela 3).

Polpas com maiores teores de pentosanas mostram tendência de produzirem papel com maior resistência à tração e com menores "bulk", porosidade e aspereza superficial, a um mesmo nível de moagem PFI. As pentosanas, com estrutura amorfa e hidrofílica, contribuem para uma maior interação e ligação entre as fibras durante a formação da folha de papel.

3.6. Aplicação dos Modelos de Regressão

Os modelos descritos nesse estudo foram desenvolvidos para obter a máxima aplicabilidade na seleção de árvores, garantia da qualidade e na produção de celulose e de papel. As três variáveis independentes definidas no modelo, as quais explicam de 53 a 72% das variações nas propriedades do papel, são relativamente fáceis de serem medidas e controladas.

A densidade básica da madeira é um dos parâmetros chave na seleção florestal e nas operações para a produção de celulose. Ela tem um alto grau de herdabilidade e pode ser

Figura 11
 ÍNDICE DE TRACÇÃO VS TEOR PENTOSANAS
 1500 REVOLUÇÕES PFI

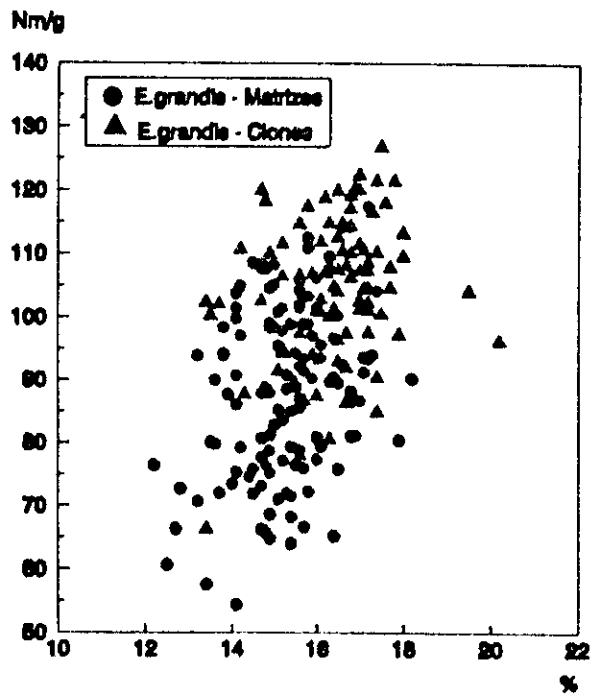


Figura 12
 BULK VS TEOR PENTOSANAS
 1500 REVOLUÇÕES PFI

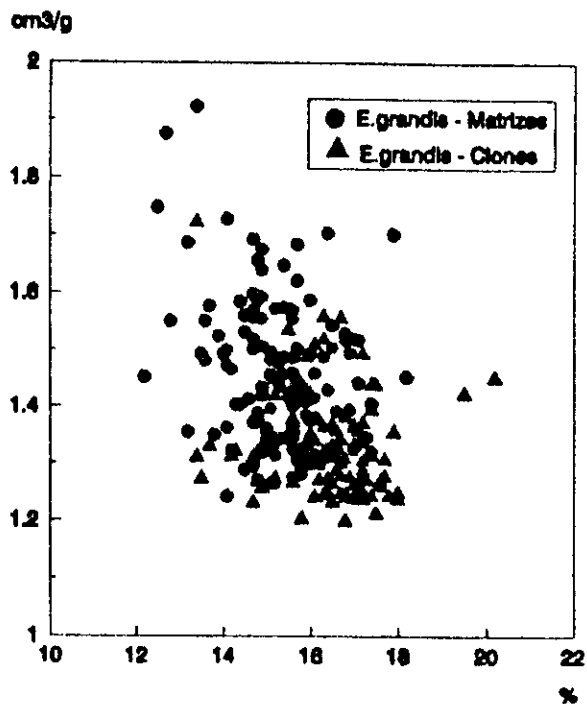


Figura 13
 ln (RESISTÊNCIA AR) VS TEOR PENTOSANAS
 1500 REVOLUÇÕES PFI

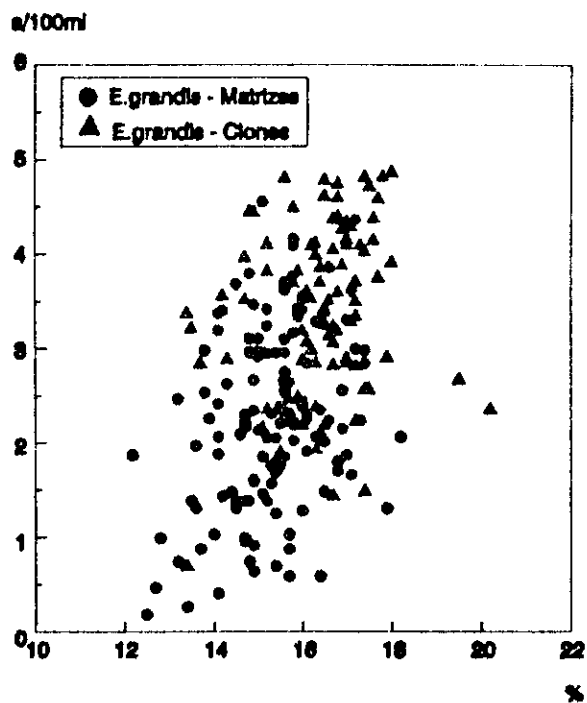
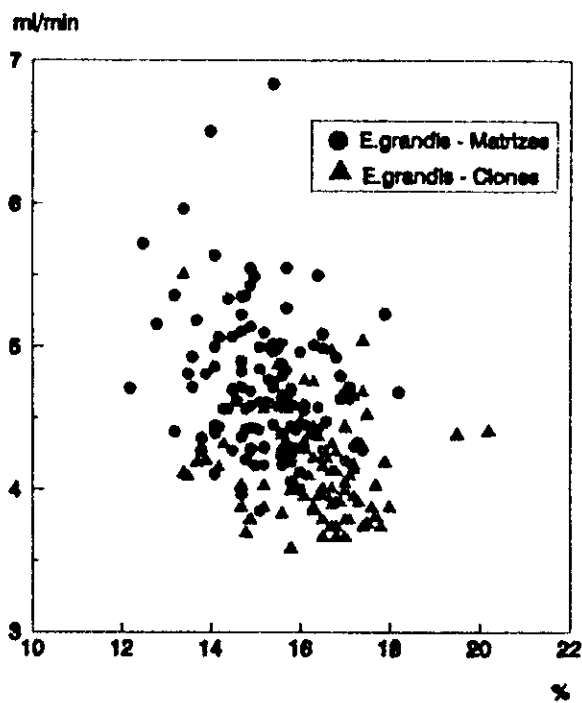


Figura 14
 ln (RUGOSIDADE) VS TEOR PENTOSANAS
 1500 REVOLUÇÕES PFI



flexibilidade das fibras, e conseqüentemente a consolidação do papel, pode ser definida na floresta.

Como observado, o número de fibras por grama é outra propriedade fundamental, também influenciando a consolidação da folha. Sendo derivada do comprimento das fibras ela é também possível de ser manipulada geneticamente, via tratos culturais. E, com os atuais medidores automáticos de fibras, a sua determinação precisa pode ser feita rotineiramente. Além disso, as diversas combinações da flexibilidade de fibras com o número de fibras por grama pode resultar no desenvolvimento de matérias primas não convencionais.

O teor de pentosanas na polpa aparece como a mais importante característica química a ser monitorada, visando a obtenção de polpa com um mínimo de degradação das fibras. O seu controle deve iniciar na floresta, na medida em que as pentosanas na madeira tendem a se correlacionar muito bem com as pentosanas presentes nas correspondentes polpas kraft de mesmo número kappa (3,25). Entretanto, ainda não está totalmente esclarecido se essa propriedade pode ser controlada via engenharia genética e tratos silviculturais.

O teor de pentosanas pode também ser muito afetado pelo modo de operação dos digestores contínuos modernos para polpação kraft, principalmente aqueles com carga distribuída de álcali, com direções alternadas de fluxo de licor e ainda com variação de temperatura e concentração dos sólidos dissolvidos. Dessa forma, essa propriedade torna-se um parâmetro chave para a qualidade, a ser controlada.

4. Conclusões

Os dados obtidos da análise de 144 árvores matrizes e 100 árvores de clones híbridos de *E. grandis* foram utilizados no desenvolvimento de modelos de regressão linear múltipla, com o objetivo de estimar propriedades do papel a partir de características das fibras selecionadas.

Um modelo muito simples foi derivado, baseado tão somente em três características das fibras, as quais são facilmente medidas e possíveis de serem controladas, confirmando o modelo recentemente obtido, também para um elevado número de árvores na análise de diferentes espécies e híbridos de eucalipto.

A densidade básica da madeira, a qual reflete a influência da flexibilidade das fibras, o número de fibras por grama, indicando a importância do número de pontos de contatos entre fibras para a consolidação do papel, e o teor de pentosanas, que influencia a flexibilização das fibras e a resistência das ligações entre fibras, foram as propriedades identificadas para explicar até 72% das variações das propriedades do papel selecionadas.

A aplicabilidade desse modelo é direta, esperando-se que ele proporcione importantes direcionamentos para programas de seleção de árvores, para a garantia da qualidade na fabricação de celulose e para o fabricante de papel atender aos crescentes aumentos de demanda da qualidade do papel.

5. Experimental

5.1. Obtenção dos Dados: Características da Madeira, Cozimento, Medições das Fibras e Análises das Polpas

As características da madeira, das fibras e do papel utilizadas nesse estudo foram obtidas a partir de 144 árvores matrizes (7 anos de idade) e 100 árvores de clones (idade entre 4 e 7 anos) híbridos de *E. grandis*.

Os cavacos foram obtidos, em equipamento industrial, para todo o volume comercial das árvores. A densidade básica dos cavacos foi determinada pelo método TAPPI.

Os cozimentos kraft foram realizados em laboratório, utilizando digestor equipado com circulação forçada de licor. A polpação, para número kappa constante = 20, foi conduzida através da variação da carga de álcali efetivo, mantendo o tempo e a temperatura constantes. Foi também mantida adequada impregnação dos cavacos com vapor, antes do cozimento, e condições constantes de operação durante a depuração e lavagem da polpa.

O preparo das polpas, moagem PFI, obtenção de folhas, condicionamento e testes das folhas de papel foram conduzidos em laboratório, conforme normas SCAN.

O comprimento, "coarseness" e o número de fibras por grama da polpa foram determinados no Analisador Automático Kajaani FS-100. A espessura da parede celular e a largura das fibras foram medidas em cortes transversais de madeira, com o uso de um fotomicroscópio acoplado a um analisador de imagens Q-920.

O teor de pentosanas na polpa foi determinado usando o método TAPPI T233 ts-63, com confirmação da análise de açúcares, via HPLC através da hidrólise ácida.

5.2. Tratamento Estatístico dos Dados

Todo o tratamento estatístico realizado nesse estudo foi feito utilizando as metodologias descritas no "Statistical Analysis System" - SAS (37) e conforme recentemente proposto para o estabelecimento do modelo matemático entre as propriedades do papel e as características das fibras (36). O conjunto de dados foi tratado para a eliminação de "outliers", verificação da existência de uma distribuição normal e de homogeneidade de variância, e para a pesquisa da existência de correlações múltiplas entre as variáveis independentes (multicolinearidade).

Para a detecção da multicolinearidade foram utilizadas duas técnicas: Regressão e Análise dos Componentes Principais (ACP). Com a confirmação da existência da multicolinearidade somente a variável que incluía a mais relevante informação e maior facilidade de medição foi considerada.

5.3. Seleção de Variáveis

A construção de modelo de regressão envolve a seleção de um sub-conjunto de variáveis que melhor se ajusta ao modelo,

produzindo, em consequência, o maior coeficiente de determinação (R^2).

A seleção das variáveis independentes de maior contribuição (probabilidade superior à 99,99%) foi feita utilizando os procedimentos R-Square e ACP (37), em que o procedimento ACP permite a análise para as 2^m equações possíveis de regressão para as m variáveis presentes no modelo.

A utilização do conjunto artificial de dados gerado pela técnica da Análise dos Componentes Principais - ACP, não resultou em acréscimo na informação obtida, razão pela qual não foi considerado.

6. Literatura Citada

1. CLAUDIO-DA-SILVA, JR., E. The Flexibility of Pulp Fibers - A Structural Approach. IN.: Proceedings of 1983 TAPPI/CPPA International Paper Physics Conference, Cape Cod. 1983.
2. CARPIM, M. A. ; BARRICHELO, L.E.G. ; CLAUDIO-DA-SILVA, JR., E. and VASCONCELOS DIAS, R. L. A Influência do Número de Fibras por Grama nas Propriedades óticas do Papel. IN.: XX Congresso Anual de Celulose e Papel, ABTCP, São Paulo, 1987. p183.
3. CAMPINHOS JR., E. and CLAUDIO-DA-SILVA, JR., E. Development of the Eucalyptus Tree of the Future. IN.: Proceedings of ESPRA Spring Conference, Seville, Spain. 1990.
4. WATSON, A. J. and DADSWELL, H.E. *Appita* 17(6):146. 1964.
5. CLARK, J. d'A. *Tappi* 45(8): 628. 1962.
6. GORRES, J. and LUNER, P. The Aparent Density of Paper. ESPRA Report No91:61. 1989.
7. DINWOODIE, J.M. *Tappi* 49(2):57. 1966.
8. GURNAGUL, N. ; PAGE, D. H. and SETH, R. S. Dry Sheet Properties of Canadian Hardwood Kraft Pulps. IN.: Proceedings of the Annual Meeting of the CPPA, 1990. pB1.
9. PAGE, D.H. and SETH, R.S. *Tappi* 63(6):113. 1980.
10. BRITT, K.W. *Tappi* 49(5):202. 1966.
11. WANGAARD, F.F. and WOODSON, G.W. *Wood Science* 5(3): 235. 1973.
12. CLARK, J. d'A. *Tappi* 48(3): 180. 1965.
13. WANGAARD, F.F. and WILLIAMS, D. L. *Tappi* 53(11). 2153. 1970.
14. DADSWELL, H. E. and WATSON, A. J. Influence of the

Transactions of the Formation and Structure of Paper Symposium, B.P.B.M.A. 1962, p537.

15. CLARK, J. d'A. Pulp Technology and Treatment of Paper. Miller Freeman Publications, Inc, San Francisco, 1985.
16. PAAVILAINEN, L. Paperi Ja Puu 72(5): 516. 1990.
17. SETH, R.S. and PAGE, D.H. Tappi 71(2): 103. 1988.
18. SETH, R.S. Fibre Quality Factors In Papermaking - I. The Importance of Fibre Length and Strength. IN.: Mat. Res. Symposium. Vol. 197. 1990.
19. SETH, R.S. Fibre Quality Factors In Papermaking - II. The Importance of Fibre Coarseness. IN.: Mat. Res. Symposium. Vol. 197. 1990.
20. ANDTBACKA, S. and DILLNER, B. Pulp Quality Aspects on Different Wood Raw Materials. IN.: Kamyu Symposium, Djakarta, 1990.
21. GORRES, J., SINCLAIR, A. and TALLENTIRE, A. Paperi Ja Puu (1): 54. 1989.
22. DUFFY, G. G. and KIBBLEWHITE, R. P. Appita 42(3): 209. 1989.
23. GURNAGUL, N.; PAGE, D.H. and SETH, R.S. Journal of Pulp and Paper Science 16(1): J36. 1990.
24. SCURFIELD, G. Tappi 59(7): 110. 1976.
25. VASCONCELOS DIAS, R.L. and CLAUDIO-DA-SILVA, JR., E.; Pulp and Paper Properties as Influenced by Wood Density. IN.: Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium, Oxford. 1985. p7-35.
26. BARRICHELO, L.E.G. and BRITO, J.O. Variações das Características da Madeira de Eucalyptus grandis e suas correlações com a Produção de Celulose. IN.: X Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP, São Paulo 1977. p41.
27. DU PLOOY, A.B.J. Appita 33(4): 257. 1980.
28. HILLIS, L. and BROWN, A.G. Ed. Eucalyptus for Wood Production. CSIRO, Australia, 1978. p290.
29. FOELKEL, C.E.B.; MORA, E. and MENOCELLI, S. Densidade Básica: Sua Verdadeira Utilidade Como índice de Qualidade da Madeira de Eucalipto para a Produção de Celulose. IN.: VI Congresso Florestal Brasileiro, SBS. São Paulo. 1990.
30. SHIMOYAMA, V.R.S. Variações da Densidade Básica e Características Anatômicas e Químicas da Madeira de Eucalyptus spp. ESALQ, São Paulo. 1991. (Tese M.S.).
31. STEADMAN, R.K. and LUNER, P. The Effect of Wet Fibre Flexibility of Sheet Apparent Density. IN.

Transactions of the 8th Fundamental Research Symposium,
Oxford. 1985. p311.

32. STEADMAN, R. Measuring the Flexibility of Paper Making
Fibres. STFI - Meddelance, D333. 1989.
33. TAM DOO, P.A. and KEREKES, R.J. Pulp & Paper Canada
83(2): 46. 1982.
34. ABITZ, P. and LUNER, P. The Relationships of Wet Fiber
Flexibility (WFF) to Fiber and Pulps Properties. ESPRI
Report Nº 94, April 1991. p67
35. PAAVILAINEN, L. and LUNER, P. Wet Fiber Flexibility as
a Predictor of Sheet Properties. ESPRI Report
84. 1986. p.152.
36. DEMUNER, B. J.; VIANNA DORIA, E. L.; CLAUDIO-DA-SILVA
JR., E. and MANFREDI, V. The Influence of Eucalypt
Fiber Characteristics on Paper Properties. IN.: PAPER
PHYSICS CONFERENCE. TAPPI. Kona - Hawaii, 1991.
37. PAGE, D.H. Tappi 52(4):674.1969.
38. FREUD, R.J. and LITTELL, R.C. SAS System for Regression.
SAS Institute INC., Cary, NC. 1986. Version 5.18, 1988.
39. LUCE, J.E. Transverse Colapse of Wood Pulp Fibres: Fiber
Models, The Physics and Chemistry of Wood Pulp Fiber
Page, D.H. Ed. TAPPI STAP no 8. 1970.
40. KALLMES, O. and CORTE, H. Tappi 43(9): 737. 1960.
41. KALLMES, O. and CORTE, H. Tappi 44(7): 519. 1961.
42. CORTE, H. and KALLMES, O. Statistical Geometry of a
Fibrous Network. IN.: Transactions of the Fundamentals
of Research Symposium, Oxford. 1961. p13.
43. DEMUNER, B.J.; MANFREDI, V. and CLAUDIO-DA-SILVA, JR., E.
Refino da Celulose de Eucalipto - Uma Análise
Fundamental. IN.: XXII Congresso Anual da ABTCP, São
Paulo. 1989.
44. GIERTZ, H.W. International Symposium on Fundamentals
Concepts of Refining. IPC, Appleton, Wis. 1980. p324.
45. GENCO, J. M.; BUSAYASAKUL, N.; MEDITORA, H. K. and
ROBBINS, W. Tappi 73(4): 223. 1990.
46. STOCKMAN, L. Svensk Papperstid. 65(23):978. 1962.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a Gilmar Mattedi, Gerson dos Santos, Denise Brioschi e Rosemara Pereira pelas contribuições na obtenção dos dados experimentais e na preparação desse manuscrito.

PAPER PROPERTIES AND EUCALYPT FIBER CHARACTERISTICS

ABSTRACT

It is today well established that paper properties are strongly related to the chemical and anatomical characteristics of the fibers. Some of these relations, particularly for kraft pulps obtained from a large number of trees (hybrids and clones of eucalypts) are discussed in this study.

The results confirmed the importance of wood basic density/fiber flexibility, number of fibers per gram and pulp pentosans content for paper quality, recently reported for different species and hybrid of eucalypts. The results also contribute to a more complete picture of the relationships between fiber and paper characteristics, and thus identify possible forestry selection and quality control parameters to meet increasing paper quality and uniformity needs.

KEYWORDS

Eucalypt, Eucalypt Kraft Pulp, Wood Basic Density, Fiber Properties, Fiber Coarseness, Number of Fibers per Gram, Pentosans, Paper Properties, Tree Breeding