

AValiação da Qualidade e Desempenho de Clones de Eucalipto na Produção de Celulose

Autores: Juliana Marangon Jardim ¹, Fernando José Borges Gomes ¹, Jorge Luiz Colodette ¹, Bruna Pirola Brahim ¹

¹ Universidade Federal de Viçosa, Brasil

RESUMO

A qualidade da madeira para a produção de celulose com alto rendimento industrial, baixo custo e alta qualidade é fator determinante para o sucesso fabril. Assim, a seleção de matérias-primas adequadas é um dos grandes desafios para as indústrias do setor. Diante disso, o presente estudo objetivou avaliar a qualidade e o desempenho de diferentes materiais genéticos de eucalipto para produção de polpa celulósica branqueada. Foram avaliadas 19 amostras quanto à sua produtividade florestal e características químicas. Após essas análises, cinco amostras foram selecionadas para avaliação do potencial de produção de polpa branqueada. Dois diferentes processos de polpação foram utilizados para converter a madeira em polpa: soda-AQ e kraft. A seleção dos materiais mais adequados foi feita com base nas seguintes características: produtividade florestal, densidade e composição química. Entre as amostras estudadas, as mais adequadas para a produção de polpa branqueada foram U1xU2, G1xUGL, DGxU2, CC1 e IG. As principais conclusões deste trabalho foram as seguintes: as amostras se comportaram de forma similar sob os diferentes processos de polpação, são de alta qualidade tecnológica e apresentaram bons resultados de rendimento depurado e boa branqueabilidade.

Palavras chave: polpação, clones de eucalipto, qualidade da madeira.

INTRODUÇÃO

A madeira de eucalipto é uma das principais matérias-primas para produção de polpa celulósica, principalmente na América do Sul. A qualidade da madeira é um fator de extrema importância quando se objetiva produção de celulose com alto rendimento industrial, baixo custo e alta qualidade. Assim, a fim de alcançar uma polpa celulósica de alta qualidade, o maior desafio das indústrias consiste na seleção de matérias-primas com características de interesse. Existem muitos estudos que visam aumentar a produtividade de madeira e melhorar sua qualidade para a produção de celulose através da seleção de clones com melhor desempenho. Bons resultados têm sido obtidos: a produtividade média das florestas brasileiras de eucalipto subiu de 24 m³/ha/ano em 1980 para 39 m³/ha/ano em 2015, representando um aumento de 62% na

produtividade das florestas plantadas no Brasil (IBÁ, 2016).

Um estudo de caracterização dos clones de eucalipto brasileiros, feito por GOMIDE *et al.* (2005), envolvendo as principais indústrias de celulose, mostrou que os plantios no Brasil têm os mais altos níveis globais de Incremento Médio Anual (IMA). Os clones analisados em seu estudo demonstraram alta produtividade, sendo 20% dos clones com IMA superior a 50 m³/ha/ano e 70% com incrementos de mais de 40 m³/ha/ano. Para a comunidade científica e as indústrias, é de suma importância o conhecimento de novas oportunidades de ganho em qualidade com as matérias-primas disponíveis para a produção de celulose. Este estudo, portanto, teve como objetivo avaliar a qualidade da madeira de 18 clones de eucalipto advindos de diferentes cruzamentos e uma amostra europeia de *Eucalyptus globulus*; visando à produção de celulose branqueada.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram avaliadas 19 amostras de madeira de eucalipto em idade de corte comercial, sendo 18 clones do projeto Genolyptus, localizado no Estado de Minas Gerais – Brasil e uma de *Eucalyptus globulus* oriundo da Europa (Tabela 1).

Foram coletados toretes de madeira de cinco árvores de cada amostra de eucalipto a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Este estudo caracterizou as 19 amostras, porém apenas cinco foram avaliadas quanto ao potencial para produção de celulose, devido ao alto custo dos procedimentos. As amostras foram selecionadas com base em suas características florestais e químicas. A madeira passou por processamento em um picador de laboratório do modelo Chogokukikai, equipado com três facas e duas telas (40 & 13 mm). Os cavacos produzidos foram homogeneizados em um misturador rotativo de 260 m³ e selecionados de acordo com a norma Scan-CM 40:94. Os cavacos retidos nas peneiras de 3 mm e 7 mm foram coletados, homogeneizados novamente e secos até cerca de 15% de umidade. Posteriormente foram armazenados em sacos plásticos. A amostragem dos cavacos para a caracterização ocorreu de acordo com a técnica de quarteamento. Foram mensuradas as densidades aparente e básica em conformidade com as normas Scan-CM 46:92 e ABNT-NBR 11941, respectivamente.

Foi também calculada a produtividade de biomassa utilizando-se a Equação 1.

$$\text{Produtividade de biomassa (t/ha/ano)} = \text{IMA (m}^3\text{/ha/ano)} \times \text{densidade básica (t/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Para as análises químicas, cerca de 1 kg de cavacos foi amostrado e moído em um moinho tipo Wiley para produzir serragem, que foi classificada de acordo com a norma Tappi T 257 cm-85 e condicionada em temperatura e umidade controladas ($23 \pm 1^\circ\text{C}$, $50 \pm 2\%$ UR) até se alcançar a umidade de equilíbrio ($\sim 10\%$). A análise de cinzas foi de acordo com a Tappi T 211 om-93. Foram determinados de acordo a Tappi T 264 cm-97 os teores de extrativos totais: etanol/tolueno(1:2) \rightarrow etanol \rightarrow água quente. Para a determinação dos componentes da parede celular foi preparada uma amostra de serragem livre de extrativos de acordo com a norma Tappi T 264 cm-97, e o teor de ácidos urônicos, grupos acetila e açúcares (glicanas, mananas, galactanas, xilanas e arabinanas) foram determinados de acordo com Wallis *et al.* (1996). Os teores de ligninas insolúvel e solúvel em ácido e a relação siringil/guaiacil (S/G) foram determinados de acordo com

Gomide & Demuner (1986), Goldschmid (1971) e Lin & Dence (1992), respectivamente. O teor de ácidos hexenurônicos foi determinado de acordo com Vuorinen *et al.* (1996).

Neste estudo foram utilizados dois tipos de polpação. Os processos soda e kraft, que são os mais utilizados para a produção de celulose branqueada de alta qualidade de eucalipto. Para um melhor desempenho do processo soda, a antraquinona foi usada como aditivo, chamado de Soda-AQ. A polpação das cinco amostras selecionadas foi feita em um digestor CRS (CPS 5010 Recycle Digester System), com dois reatores individuais de dez litros cada um, equipado com um sistema de circulação forçada de licor, eletricamente aquecido e com controle de temperatura e pressão. O digestor é acoplado com um sistema de refrigeração para garantir o resfriamento do licor após a polpação. As condições experimentais utilizadas estão apresentadas na Tabela 2 e foram mantidas constantes durante todo o processo. Foram realizados vários ensaios para cada amostra, usando diferentes cargas alcalinas até atingir os números kappa 15 e 20. Esses números foram escolhidos porque correspondem com o mercado de celulose de eucalipto.

Tabela 1. Descrição das amostras estudadas

Amostras		
1	U1xU2	<i>E. urophylla</i> (Flores IP) x <i>E. urophylla</i> (Timor)
2	U2xC1	<i>E. urophylla</i> (Timor) x <i>E. camaldulensis</i> (VM1)
3	G1xUGL	<i>E. grandis</i> (Coffs Harbour) x [<i>E. urophylla</i> (R) x <i>E. globulus</i> (R)]
4	U1xUGL	<i>E. urophylla</i> (Flores IP) x [<i>E. urophylla</i> (R) x <i>E. globulus</i> (R)]
5	U1xC2	<i>E. urophylla</i> (Flores IP) x <i>E. camaldulensis</i> (VM2)
6	C1xC2	<i>E. camaldulensis</i> (VM1) x <i>E. camaldulensis</i> (VM1)
7	DGxUGL1	[<i>E. dunnii</i> (R) x <i>E. grandis</i> (R)] x [<i>E. urophylla</i> (R) x <i>E. globulus</i> (R)]
8	DGxU2	[<i>E. dunnii</i> (R) x <i>E. grandis</i> (R)] x <i>E. urophylla</i> (Timor)
9	C1xUGL	<i>E. camaldulensis</i> (VM1) x [<i>E. urophylla</i> (R) x <i>E. globulus</i> (R)]
10	G1xGL2	<i>E. grandis</i> (Coffs Harbour) x <i>E. globulus</i> (R)
11	DGxC1	[<i>E. dunnii</i> (R) x <i>E. grandis</i> (R)] x <i>E. camaldulensis</i> (VM1)
12	U2xGL1	<i>E. urophylla</i> (Timor) x <i>E. globulus</i> (R)
13	DGxGL2	[<i>E. dunnii</i> (R) x <i>E. grandis</i> (R)] x <i>E. globulus</i> (R)
14	U1xD2	<i>E. urophylla</i> (Flores IP) x <i>E. dunnii</i> (R)
15	U1xG2	<i>E. urophylla</i> (Flores IP) x <i>E. grandis</i>
16	CC1	<i>E. urophylla</i> (IP) x <i>E. grandis</i> (IP) clone comercial
17	CC2	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> clone comercial
18	CC3	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i> clone comercial
19	IG	<i>E. globulus</i> (europeu)

Tabela 2. Condições do processo de polpação

Parâmetro	Condição
Madeira, kg	1,0
Álcali ativo como NaOH, %	Variável *
Sulfidez como NaOH, %	26
Carga de antraquinona, %	0,05**
Relação licor/madeira, L/kg	4/1
Temperatura máxima, oC	170
Tempo até temperatura, min	90
Tempo a temperatura, min	50

* Dosagem de álcali variável para atingir o número kappa de interesse (kappas 15 e 20).

** Dosagem utilizada somente para o processo Soda-AQ.

Após o cozimento as polpas foram lavadas e em seguida depuradas em um equipamento com placas perfuradas com aberturas de 0,2 mm (Voith). O material retido na peneira (rejeito) foi seco e pesado. A polpa peneirada/depurada foi desaguada em uma centrífuga até a consistência de cerca de 30%, pesada e armazenada em sacos de polietileno para posteriores análises. Com os pesos obtidos foram determinados os rendimentos bruto e depurado.

As polpas produzidas com números kappa 15 e 20 foram branqueadas pela sequência livre de cloro elementar (ECF): O-D-(EP)-D até alvura 90% ISO. A designificação com oxigênio (O) foi executada a 10% de consistência, 100 °C, 60 min, 700 kPa de pressão, 20 kg de NaOH/t de polpa e 20 kg de O₂/t de polpa. O primeiro estágio com dióxido de cloro (D) foi realizado a 10% de consistência, pH final 3,5, 85 °C, 120 min e fator kappa 0,20 para polpas com número kappa 15 e 0,24 para polpas com kappa 20. O estágio com peróxido de hidrogênio (EP) foi executado a 10% de consistência, pH final 10,5, 85 °C, 120 min e com doses de peróxido de 0,5 sobre o peso da polpa. O segundo estágio de dióxido de cloro (D) foi realizado a 10% de consistência, pH final 5,5, 70 °C, 120 min e com dose variável de dióxido de cloro, a fim de atingir a alvura desejada. As polpas branqueadas foram avaliadas pela alvura, estabilidade de alvura e viscosidade de acordo com as normas Tappi T 452 om-08, Tappi UM 200 um-12 e Tappi T 230 om-08, respectivamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seleção das amostras baseada nas características florestais e químicas

Características florestais

Dois fatores muito importantes sobre o uso de biomassa para produção de celulose são o teor da umidade e da densidade, visto que afetam os custos de colheita, transporte e utilização. As madeiras de eucalipto analisadas neste estudo mostraram um teor de umidade médio de 55% e densidade de 500 kg/m³. Tais valores são considerados satisfatórios para a produção de celulose (GOMIDE *et al.*, 2005). O IMA variou entre 16 e 101,6 m³/ha/ano, sendo o valor mais baixo do clone C1xC2. Isso pode ser explicado pelo fato de o clone em questão ser mal adaptado às condições climáticas do Estado de Minas Gerais e não se desenvolveram satisfatoriamente. Entre as amostras, o maior crescimento (101,6 m³/ha/ano) foi obtido pelo clone DGxU2, que é um híbrido triplo de (*Eucalyptus dunnii* x *Eucalyptus grandis*) x *Eucalyptus urophylla* (Tabela 3). Essa produtividade é muito acima da média de IMA obtida comercialmente no Brasil (~ 40-60 m³/ha/ano) (BRACELPA, 2013).

Tabela 3. Características florestais e físicas das amostras de eucalipto estudadas

Amostra	IMA, m ³ /ha/ano	Densidade básica, kg/m ³	Produtividade, t/ha/ano	Densidade a granel, kg/m ³
U1xU2	86,0	504	43,3	209
U2xC1	54,1	547	29,6	220
G1xUGL	46,2	500	23,1	202
U1xUGL	46,9	496	23,3	193
U1xC2	52,9	517	27,4	203
C1xC2	16,0	533	8,5	207
DGxUGL1	57,7	449	25,9	193
DGxU2	101,6	496	50,4	203
C1xUGL	19,9	519	10,3	220
G1xGL2	39,3	530	20,8	211
DGxC1	72,6	500	36,3	213
U2xGL1	40,1	506	20,3	208
DGxGL2	28,5	489	13,9	197
U1xD2	42,6	441	18,8	178
U1xG2	63,4	518	32,8	228
CC1	80,9	480	38,8	183
CC2	80,3	473	38	179
CC3	40,2	472	19	183
IG	20,0	532	10,6	206

Características químicas

Para quantificação dos componentes da parede celular é necessária a remoção dos extrativos presentes na biomassa. O procedimento padrão é eficiente na remoção de todos os extrativos pela utilização de uma combinação de solventes polares e apolares e na quantificação dos extrativos da biomassa, uma vez que os principais componentes da parede celular (celulose, hemiceluloses e ligninas) não são solúveis nesses solventes. Na Tabela 4 estão apresentados os teores de extrativos totais das amostras estudadas. Os extrativos são, de modo geral, problemáticos devido à sua viscosidade e aderência, causando paradas para limpeza de equipamentos. Todas as amostras apresentaram teores admissíveis de extrativos (1,9%-4,9%).

É importante o conhecimento do teor de minerais da madeira, uma vez que também são prejudiciais ao processo, pois causam corrosão e incrustações em equipamentos, reduzem o poder calorífico da madeira e diminuem a produtividade fabril. Em geral, a quantidade de inorgânicos em eucaliptos é baixa e aceitável para diversas aplicações (MOREIRA, 2006). Os inorgânicos totais mensurados pela combustão completa da biomassa (teor de cinzas) variaram na faixa de 950-2.510 mg/kg (Tabela 4). Outro fato interessante sobre o teor de minerais na biomassa: tendem a diminuir com o envelhecimento devido à baixa taxa de deposição de biomassa em função do tempo (MORAIS, 2008).

Ainda na Tabela 4 são apresentados os resultados da quantificação dos açúcares, grupos acetila, ácidos urônicos, ligninas e relação siringil/guaiacil presentes nas amostras. Nota-se que houve variação

significativa do teor de lignina total entre as amostras, variando de 27,1% a 31,3%. O valor máximo obtido foi no híbrido U1xC2 e o mínimo no G1xGL2. Esses valores são considerados aceitáveis para clones de eucalipto, porém vale ressaltar que para produção de celulose é desejável o menor teor de lignina possível e alta relação S/G, por facilitarem a polpação da madeira (GOMES *et al.*, 2008).

O total (%) apresentado na tabela a seguir é a quantificação completa da madeira (extrativos, carboidratos, lignina e cinzas). O valor encontrado não é 100% devido a erros experimentais.

Com base em todas as análises, as cinco amostras selecionadas para a produção de celulose foram: 1. o clone U1xU2, selecionado com base em seu IMA elevado (83 m³/ha/ano), alta densidade básica, alta produtividade de biomassa (43 t/ha/ano); 2. clone G1xUGL, por apresentar elevado teor de xilana e possuir *Eucalyptus globulus* em seu genótipo, com elevada relação S/G, embora bastante desafiador pelo alto teor de extrativos totais (4,9%); 3. clone DGxU2, selecionado por ter apresentado o maior IMA (101 m³/ha/ano) e a maior produtividade (~ 50 t/ha/ano) entre todos os eucaliptos avaliados, além de boa densidade; 4. clone comercial, CC1, obtido de uma grande empresa florestal brasileira por sua excelente produtividade (38,5 t/ha/ano), boa densidade, o maior teor celulose e o menor teor de lignina entre todas as amostras; 5. *Eucalyptus globulus* puro (IG), selecionado a fim de se fazer uma comparação dessa madeira com os clones. Apesar de essa amostra apresentar o menor IMA (~ 20 m³/ha/ano), possui composição química muito favorável, visto seu baixo teor de lignina e extrativos, elevado teor de xilana e alta relação S/G (4,0).

Tabela 4. Composição química das amostras de eucalipto estudadas

Amostra	Extrativos totais, %	Cinzas totais, %	Açúcares, (%)					Lignina solúvel, %	Lignina total, %	Relação S/G	Grupos acetila, %	Grupos de ácidos urônicos, %	TOTAL*, %
			Glicanas	Xilanas	Galactanas	Mananas	Arabinanas						
U1xU2	3,6	0,10	46,1	11,8	0,8	0,8	0,2	4,3	30,3	2,8	2,1	3,7	99,5
U2xC1	3,4	0,19	45,5	10,7	1,2	1,0	0,2	4,6	30,8	2,7	1,9	4,0	98,8
G1xUGL	4,9	0,20	43,9	13,0	0,8	0,9	0,2	4,7	28,9	2,9	2,7	3,8	99,2
U1xUGL	3,6	0,12	44,9	11,7	1,1	0,8	0,2	5,0	29,7	3,1	2,4	4,0	98,5
U1xC2	2,8	0,13	45,6	10,0	1,4	1,1	0,2	4,5	31,3	3,0	1,8	3,8	98,3
C1xC2	3,0	0,25	45,6	9,7	1,6	0,9	0,3	5,1	31,1	3,0	1,6	4,1	98,0
DGxUGL1	2,8	0,20	45,5	13,0	0,9	0,8	0,3	5,3	29,2	3,2	2,6	4,0	99,4
DGxU2	2,7	0,23	45,3	12,6	0,9	1,0	0,3	4,4	29,8	2,6	2,5	4,0	99,2
C1xUGL	2,1	0,22	46,0	11,9	1,1	0,9	0,3	5,0	30,7	3,2	2,2	4,0	99,3
G1xGL2	2,8	0,18	46,4	14,1	1,0	0,8	0,3	5,0	27,1	3,5	3,0	3,9	99,6
DGxC1	1,9	0,14	47,2	10,8	1,2	0,9	0,3	4,7	31,0	2,8	1,8	4,0	99,1
U2xGL1	2,5	0,18	45,5	13,4	1,2	0,8	0,3	5,6	29,3	3,8	2,6	4,0	99,7
DGxGL2	1,9	0,18	45,8	12,9	1,1	1,0	0,3	4,4	28,2	2,9	2,5	3,8	97,8
U1xD2	3,0	0,14	48,1	11,4	1,0	0,9	0,3	4,4	28,6	2,6	2,0	3,9	99,3
U1xG2	2,8	0,19	46,8	11,8	1,0	0,8	0,3	4,4	30,2	2,6	2,0	4,0	99,7
CC1	2,3	0,16	49,4	12,0	1,2	0,9	0,3	4,2	27,2	2,7	1,9	4,0	99,3
CC2	3,7	0,18	46,9	11,4	0,8	1,1	0,2	4,6	28,4	2,9	2,1	3,8	98,5
CC3	3,5	0,17	47,4	11,2	1,0	1,1	0,2	4,1	28,4	2,4	1,9	3,9	98,7
IG	2,5	0,32	46,6	13,6	1,5	1,4	0,2	4,8	28,6	4,0	2,6	3,0	100,3

*Valor que é o somatório de extrativos, cinzas, açúcares, lignina total, grupos acetila e ácidos urônicos

Desempenho na polpação das amostras selecionadas

Foram feitos quatro cozimentos, com repetição para cada amostra, a fim de elaborar uma curva de deslignificação, conforme descrito na metodologia. Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos cozimentos.

O melhor desempenho observado foi da amostra IG em relação à demanda de álcali, na faixa de kappa estudada. Isso pode ser atribuído à sua alta relação S/G (4/1). Para kappa 15, as amostras U1xU2 e G1xUGL consumiram maior quantidade de químicos em ambos os processos. Tal resultado é atribuído ao alto teor de lignina da amos-

tra U1xU2 e alto teor de extrativos da amostra G1xUGL.

Como era esperado, o processo *kraft* consumiu a menor quantidade de álcali para atingir o kappa desejado em relação ao processo Soda-AQ, devido à sua maior seletividade. Observou-se que o teor de rejeitos diminuiu com o aumento da intensidade de deslignificação, o que também era esperado e já descrito na literatura (GOMIDE *et al.*, 2010). A alvura e a viscosidade obtidas (Tabela 5) para todas as amostras selecionadas, em todos os processos, para ambos os kappas, podem ser consideradas satisfatórias para a maioria das aplicações da polpa celulósica (GOMIDE *et al.*, 2005).

Tabela 5. Resultados da polpação das amostras selecionadas

Processo kraft, kappa 15					
	U1 x U2	G1 x UGL	DG x U2	CC1	IG
Carga alcalina, %	27,5	27,5	28,0	26,0	22,0
Rendimento depurado, %	49,5	49,6	49,6	50,4	54,7
Teor de rejeitos, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
Viscosidade, dm ³ /kg	1032	1144	892	939	990
Alvura, % ISO	33,52	32,29	34,31	33,32	32,29
HexA, mmol/kg	39,8	41,8	39,1	39,5	39,1
Processo kraft, kappa 20					
	U1 x U2	G1 x UGL	DG x U2	CC1	IG
Carga alcalina, %	22,0	21,0	22,0	20,0	17,0
Rendimento depurado, %	51,2	50,4	52,0	52,0	55,5
Teor de rejeitos, %	0,3	0,5	0,4	0,4	0,6
Viscosidade, dm ³ /kg	1073	1193	1054	1100	1064
Alvura, % ISO	31,93	30,57	31,79	31,1	31,6
HexA, mmol/kg	48,8	48,6	48,9	46,4	37,3
Processo Soda-AQ, kappa 15					
	U1 x U2	G1 x UGL	DG x U2	CC1	IG
Carga alcalina, %	35,0	31,0	29,5	29,5	25,0
Rendimento depurado, %	47,3	47,0	48,1	49,6	52,8
Teor de rejeitos, %	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Viscosidade, dm ³ /kg	875	748	951	972	990
Alvura, % ISO	33,33	33,98	33,99	33,98	35,39
HexA, mmol/kg	15,8	21,2	15,9	21,8	29,4
Processo Soda-AQ, kappa 20					
	U1 x U2	G1 x UGL	DG x U2	CC1	IG
Carga alcalina, %	24,0	23,0	22,0	22,0	22,0
Rendimento depurado, %	50,0	51,0	51,1	51,6	55,2
Teor de rejeitos, %	1,1	0,2	0,4	0,6	0,4
Viscosidade, dm ³ /kg	919	917	1020	1028	1064
Alvura, % ISO	30,82	32,05	30,82	29,59	32,18
HexA, mmol/kg	40,3	48,2	43,4	45,7	41,6

Tabela 6. Desempenho da deslignificação com oxigênio das amostras selecionadas

Processo	Amostra	Kappa 15		Kappa 20	
		Redução kappa, %	Ganho de alvura, % ISO	Redução kappa, %	Ganho de alvura, % ISO
Kraft	U1 X U2	48,4	19,6	46,1	17,7
	G1 x UGL	46,2	18,1	46,1	16,5
	DG x U2	46,6	18,4	46,2	17,7
	CC1	47,4	20,1	43,8	16,2
	IG	44,0	19,3	46,3	17,9
Soda-AQ	U1 X U2	57,5	18,1	50,5	17,1
	G1 x UGL	57,0	19,8	45,5	15,8
	DG x U2	57,7	18,2	47,8	15,1
	CC1	54,0	18,3	47,3	16,6
	IG	53,3	18,0	47,4	16,7

Branqueabilidade das amostras selecionadas

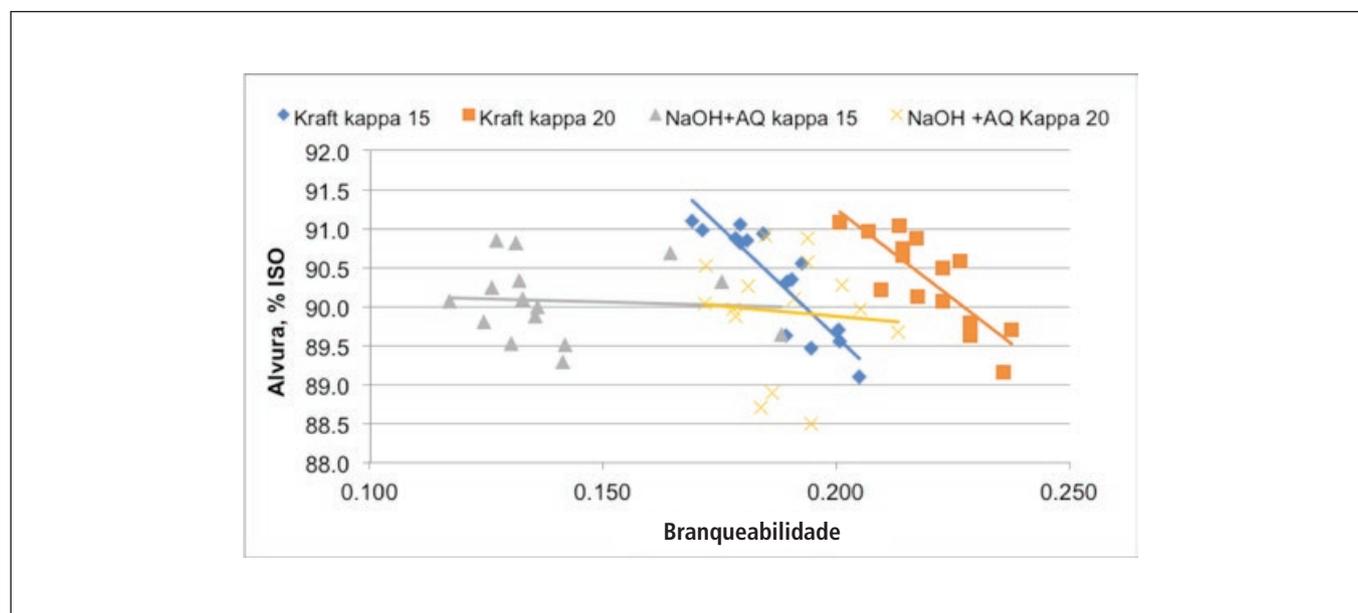
As polpas produzidas pelos dois processos e dois diferentes kappas foram branqueadas utilizando-se uma sequência ECF, conforme descrito na metodologia. Na Tabela 6 são apresentados os resultados da deslignificação com oxigênio (estágio O). A eficiência da deslignificação é mensurada pela redução do kappa após o estágio. Observou-se que essa eficiência foi impactada negativamente pelo aumento do número kappa.

Observou-se que a redução do kappa foi maior no processo Soda-AQ. Esse fato pode ser explicado pelo menor teor de ácidos hexenurônicos em polpas produzidas pelo processo Soda-AQ. De acordo com a literatura, polpas com menores teores de ácidos hexenurônicos têm melhor desempenho no estágio O, visto que esses componentes contribuem com o número kappa e não são removidos nesse estágio (EIRAS & COLODETTE, 2003). Em geral, porém, a eficiência observada para todos os clones estudados, para os dois processos e números kappa, pode ser considerada satisfatória de acordo com RABELO (2006).

Foi avaliada a branqueabilidade das polpas estudadas, parâmetro definido pela razão entre o kappa da polpa na entrada do processo e o consumo de Cloro Ativo Total (CAT) necessário para atingir alvura de 90% ISO. O CAT foi calculado pela seguinte equação:

$$\text{CAT} = [(\text{ClO}_2 \times 2,63) + (\text{H}_2\text{O}_2 \times 2,09)] \quad (2)$$

Na equação acima, os fatores 2,63 e 2,09 são conversões do ClO_2 e H_2O_2 em cloro ativo (Cl_2) com base em seus equivalentes de oxidação. Observou-se que a branqueabilidade foi influenciada pelo processo de produção (Figura 1). O melhor desempenho foi obtido pelas polpas *kraft* e kappa 20, e o pior foi observado para as polpas Soda-AQ e kappa 15. A pior branqueabilidade das polpas produzidas pelo processo Soda-AQ já era esperada, visto que para o mesmo kappa essa polpa possui mais lignina do que a polpa *kraft*. A diferença se deve ao teor de ácidos hexenurônicos nas polpas. Esse componente contribui com o número kappa, é mais facilmente removido no branqueamento do que a lignina e mais preservado no processo *kraft*.

**Figura 1.** Branqueabilidade das polpas estudadas em cada processo e kappas utilizados

As Figuras 2 e 3 apresentam a branqueabilidade e a viscosidade, respectivamente, para cada amostra. A melhor branqueabili-

dade no processo *kraft* kappa 15 foi obtida pelo clone G1xUGL (CAT 36,4 kg/tas; viscosidade 636 dm³/kg) e no kappa 20, pelo

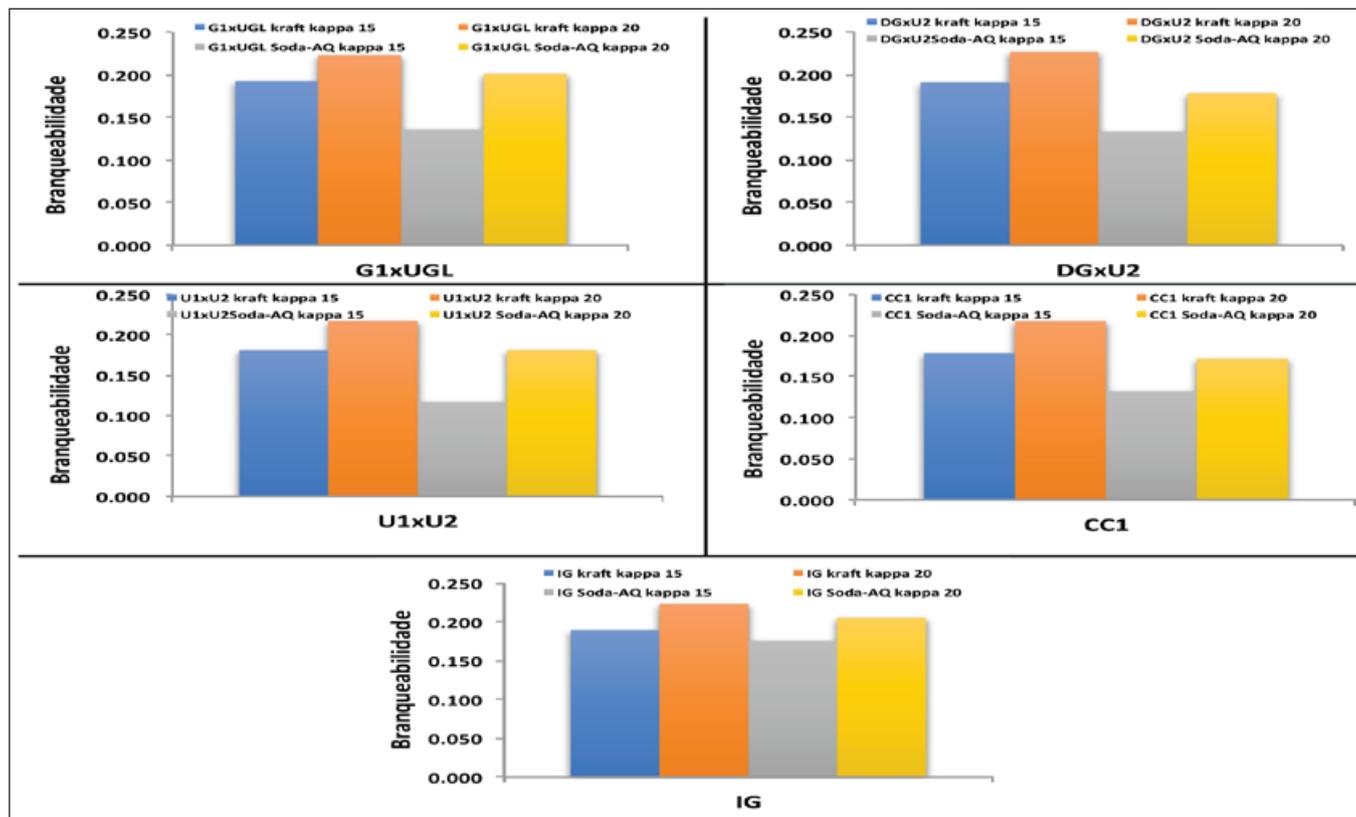


Figura 2. Branqueabilidade das polpas estudadas em cada processo e kappas utilizados

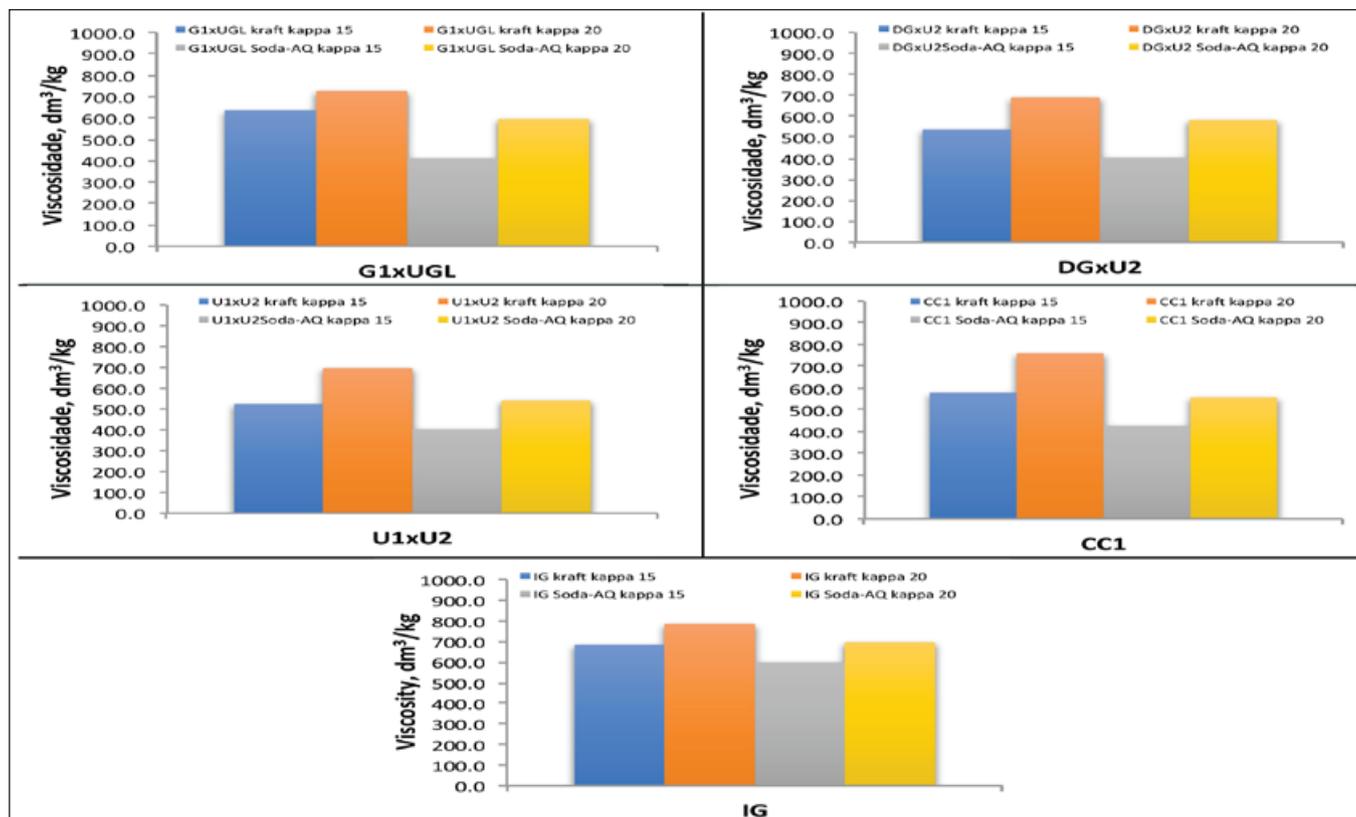


Figura 3. Viscosidade das polpas estudadas em cada processo e kappas utilizados

clone G1xUGL (CAT, 40,6 kg/tas; viscosidade 727 dm³/kg). Para o processo soda-AQ kappa 15, o clone IG (CAT, 37,5 kg/tas; viscosidade 412 dm³/kg) apresentou o melhor desempenho, e no kappa 20 a melhor branqueabilidade foi obtida pela amostra IG (CAT, 45,1 kg/tas; viscosidade 696 dm³/kg).

A viscosidade está relacionada com a degradação dos carboidratos causados pelo cozimento e branqueamento. Pela análise desse parâmetro é possível inferir quanto à seletividade do processo. Maiores valores de viscosidade indicam melhor desempenho (maior seletividade). Como esperado, polpas com menores kappas obtiveram a menor viscosidade. O processo *kraft* mostrou valores maiores de viscosidade do que o processo soda-AQ.

CONCLUSÕES

As amostras se comportaram de forma similar sob os diferentes processos de polpação.

Os resultados deste estudo indicam que as amostras avaliadas são de alta qualidade tecnológica e podem ser utilizadas pelos principais fabricantes de celulose branqueada, uma vez que a maioria teve desempenho semelhante ao clone CC1, que já é usado comercialmente.

As amostras apresentaram bons resultados de rendimento depurado para os dois processos de polpação utilizados, porém três clones obtiveram baixos rendimentos no processo Soda-AQ, kappa 15. No processo *kraft*, kappa 20, observaram-se os maiores rendimentos de cozimento (50,4-55,5%).

Ressalta-se que todas as amostras apresentaram boa branqueabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT-NBR. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE CELULOSE E PAPEL – BRACELPA. Disponível em: <<http://www.bracelpa.com.br>>. Acesso em: 22 mar. 2016.
- EIRAS, K. M. M.; COLODETTE, J. L. Influência das condições de operação no estágio DHT na branqueabilidade e nas características físico-químicas da polpa e do filtrado. 34.º Congresso Anual de Celulose e Papel, São Paulo, 2001.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: Lignins: Occurrence, formation, structure and reactions (Ed: K. V. Sarkanen, and C. H. Ludwig), John Wiley and Sons, New York, USA, p. 241-266, 1971.
- GOMES, F. J. B.; GOMES, A. F.; COLODETTE, J. L.; GOMES, C. M.; SOUZA, E.; MACEDO, A. M. L. Influência do teor e da relação S/G da lignina da madeira no desempenho da polpação kraft. O Papel (São Paulo), v. 12, p. 95-105, 2008.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de Eucalyptus do Brasil. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 29, n.1, p.129-137, 2005.
- GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. Revista O Papel, v. 47, n.8, p.36-38, 1986.
- GOMIDE, J. L.; FANTUZZI, N. H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. Revista Árvore, Viçosa, v. 34, n. 2, Apr. 2010.
- LIN, S. Y.; DENCE, C. W. Methods in lignin chemistry. Berlin: Springer-Verlag, 578 p. 1992.
- MORAIS, P. H. D.. Influência da idade de clones de eucalipto na composição química e polpabilidade da madeira e na branqueabilidade e propriedades das polpas. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- MOREIRA, E. Efeito da lixiviação ácida de cavacos de eucalipto no processo kraft. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2006.
- RABELO, M. S. Tecnologias avançadas para o pré-branqueamento de polpa kraft de eucalipto. Teses de doutorado apresentada à Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD TESTING COMMITTEE. Scan Test Methods, 1992 e 1994.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Tappi Standard Methods. Atlanta: Tappi, 1985, 1993, 1997, 2008 e 2012.
- VUORINEN, T.; TELEMAN, A.; FAGERSTRÖM, P.; BUCHERT, J.; TENKANEN, M. Selective hydrolysis of hexenuronic acid groups and its application in ECF and TCF bleaching of kraft pulps. In: INTERNATIONAL PULP BLEACHING CONFERENCE, 1996, Washington. Proceedings... Washington, 1996, p. 43-51.
- WALLIS, A. F. A.; WEARNE, R. H.; WRIGHT, P. J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. Appita Journal, v. 49, n.4, p. 258-262, 1996.