

CÁSSIO ANDERSON MARTINS CAETANO

**AVALIAÇÃO DA CANA ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE POLPA
CELULÓSICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional, em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C128a
2018
Caetano, Cássio Anderson Martins, 1972-
Avaliação da cana energia para a produção de polpa
celulósica / Cássio Anderson Martins Caetano. – Viçosa, MG,
2018.
ix, 30f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando José Borges Gomes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 21-24.

1. Polpação alcalina por soda. 2. Antraquinonas.
3. Biomassa vegetal. 4. Bagaço de cana. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Tecnologia de Celulose e Papel. II. Título.

CDO adapt CDD 22. ed. 634.986113

CÁSSIO ANDERSON MARTINS CAETANO

**AVALIAÇÃO DA CANA ENERGIA PARA A PRODUÇÃO DE POLPA
CELULÓSICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional, em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de Fevereiro de 2018

Profª Dra. Claudia Marcia Gomes

Prof. Dr. Jorge Luiz Colodette
(Coorientador)

Prof. Dr. Fernando José Borges Gomes
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Geraldo e Elisa (*in memorian*), pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, Carlos Alberto, Sidney, Cristiano e Silvano, por se fazerem tão presentes nos momentos difíceis e pelo incentivo à minha carreira.

À minha esposa Flaviana, meus filhos Matheus e Arthur pelo carinho e apoio em mais uma jornada.

Ao Professor e orientador Fernando José Borges Gomes, pela amizade, apoio e incentivo, e principalmente por contribuir para o meu crescimento profissional.

Ao professor Jorge Luiz Colodette, por me permitir fazer parte de sua equipe, pela orientação e confiança, e pela grande oportunidade de crescimento profissional que me proporcionou durante esses anos da minha vida.

Aos professores Rubens Chaves de Oliveira, Cláudio Mudadu Silva e José Lívio Gomide (*in memorian*) pelos ensinamentos e orientações.

Aos alunos, funcionários e estagiários do Laboratório de Celulose e Papel – LCP/ UFV, e a todos que, direta ou indiretamente, me deram apoio e incentivo. Meus sinceros agradecimentos.

Enfim, agradeço a todos que participaram desta vitória.

BIOGRAFIA

Cássio Anderson Martins Caetano, filho de Geraldo Vicente Caetano e Elisa Martins Caetano (*in memoriam*), nasceu em 01 de março de 1972, na cidade de Viçosa, Minas Gerais.

Concluiu o ensino fundamental e médio no colégio Estadual Dr. Raimundo Alves Torres.

Em abril de 1995, iniciou seu trabalho no Laboratório de Celulose e Papel, através da Sociedade de Investigações Florestais, até os dias atuais exercendo atividades técnicas laboratoriais pertinentes à produção de celulose e papel.

No ano de 2009, ingressou no curso de Tecnologia de Gestão Ambiental pela Faculdade Univiçosa, graduando-se em 2011.

Ingressou no Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel na Universidade Federal de Viçosa em 2015, sendo o mesmo concluído em 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS.....	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	2
3.1. Material	2
3.2. Metodologia	2
3.2.1. Densidades básica e aparente do material	2
3.2.2. Caracterização química	3
3.2.3. Caracterização química polpação soda /antraquinona (SODA-AQ)	3
3.2.4. Branqueamento.....	4
3.2.5. Propriedades físico-mecânicas das polpas	5
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	6
4.1. Densidades básica e aparente da biomassa	6
4.2. Caracterização química.....	7
4.2.1. Conteúdo de minerais e cinzas	9
4.2.2. Análise elementar	10
Polpação Soda /Antraquinona (Soda-AQ)	10
4.2.3. Branqueamento.....	12
4.2.3.1. Deslignificação com oxigênio:.....	13
4.2.3.2. Branqueabilidade das polpas:.....	13
4.2.4. Propriedades físico-mecânicas das polpas	15
4.2.4.1. Refinabilidade das Polpas	15
4.2.4.1. Propriedades de resistência das polpas.....	17
4.2.5. Propriedades ópticas	18
5. CONCLUSÕES	20
6. REFERÊNCIAS	21
APÊNDICE	25

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

A_{Er} – Álcali efetivo residual

AQ. – antraquinona

a.s. – absolutamente seco

CAT – cloro ativo total

D – estágio do branqueamento de dioxidação

dm³/Kg – densímetro cúbico por quilograma

(EP) – Extração alcalina com peróxido de hidrogênio

Hexa – ácido hexenurônico

kg – quilograma

kg/m³ – quilogramas por metro cúbico

kg/tas – quilogramas por tonelada absolutamente seco

mg/kg – miligramas por quilograma

NaOH – hidróxido de sódio

MJ/kg – megajoule por quilograma

PCS – poder calorífico superior

PCI – poder calorífico inferior

Pré-O₂ – deslignificação com oxigênio

P – peróxido de hidrogênio

P&W – papéis de imprimir e escrever

spp. – espécie identificada

SCAN – Scandinavian pulp, paper and board testing committee

°SR – Grau Schopper Riegler

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Consumo de energia versus °SR para as polpas submetidas ao processo de refino. Onde: Linha Laranja, polpa branqueada, Polpa A; e Linha Roxa, polpa marrom Polpa B. 17
- Figura 2.** Curvas das propriedades de resistência físico-mecânica das polpas estudadas em relação a intensidade de refinamento mensurada pelo °SR, sendo: (A) índice de rasgo; (B) índice de tração; e (C) índice de arrebentamento. Onde: Linha Laranja, polpa branqueada, Polpa A; e Linha Roxa, polpa marrom Polpa B..... 18
- Figura 3.** Curvas das propriedades ópticas de polpas de cana energia branqueadas, sendo: (A) opacidade; e (B) coeficiente de dispersão de luz..... 19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Procedimentos analíticos utilizados para a caracterização química da cana energia	3
Tabela 2. Condições dos cozimentos para a cana energia	4
Tabela 3. Parâmetros determinados na polpa marrom e licores residuais resultante do processo dos cozimentos soda convencional	4
Tabela 4. Condições estabelecidas para os estágios do branqueamento ECF da polpa obtida para kappa 21 (Polpa A)	5
Tabela 5. Ensaio físico-mecânicos e ópticos e respectivos métodos de determinação	6
Tabela 6. Densidade básica e aparente das biomassas de cana energia, cana de açúcar convencional e <i>Eucalyptus sp.</i>	7
Tabela 7. Composição química da cana energia, cana convencional e eucalipto	8
Tabela 8. Análise dos minerais da cana energia comparados com dados obtidos na literatura para espécies de cana de açúcar convencional e eucalipto	9
Tabela 9. Análise elementar, cinzas, sílica e poder calorífico da cana energia, cana convencional e <i>Eucalyptus sp.</i>	10
Tabela 10. Resultados da polpação Soda-AQ para a amostra de bagaço de cana de açúcar para as polpas kappa 21 e kappa 60	12
Tabela 11. Cloro ativo total para polpas de cana energia e <i>Eucalyptus spp.</i> para atingir uma alvura de 90 % ISO, utilizando-se polpas de kappa inicial e sequências de branqueamento similares	14
Tabela 12. Dados de viscosidade e estabilidade de alvura obtidos para a polpa branqueada de cana energia para uma alvura de 90 % ISO, comparada com dados da literatura para polpas de kappas similares submetidas a mesma sequência de branqueamento	15

RESUMO

CAETANO, Cássio Anderson Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Avaliação da cana energia para a produção de polpa celulósica.** Orientador: Fernando José Borges Gomes. Coorientador: Jorge Luiz Colodette.

A utilização da biomassa vegetal residual da agroindústria, rica em materiais lignocelulósicos, tem despertado o interesse de muitos setores industriais tais como o de polpa celulósica e sucroenergético, por exemplo. Dentre os vários tipos de resíduos agrícolas disponíveis, se destaca o bagaço da cana de açúcar. A produtividade anual da cana energia está entre 180-250 toneladas de matéria verde total por hectare, dependendo do ambiente de produção. Ainda no que diz respeito a esse tipo de biomassa, as indústrias e institutos de pesquisa tem desenvolvido espécies de cana com maior conteúdo de material fibroso, o que é uma inovação recente desse setor. O objetivo desse trabalho foi caracterizar a cana com elevado conteúdo de fibras quanto a sua densidade, a composição química e ao potencial para a produção de polpa celulósica pelo processo Soda-AQ. Os resultados desse estudo foram comparados com dados da literatura quanto a espécies de cana-de-açúcar convencional e à madeira de eucalipto. Os resultados obtidos permitem concluir que a cana energia possui potencial para produção de polpa celulósica, apresentando os seguintes pontos positivos: (1) baixo conteúdo de lignina comparado a madeira; (2) conteúdo de carboidratos superior comparado a madeira; e (3) rendimento da polpação próximo ao reportado para a madeira de eucalipto. Entretanto, alguns parâmetros da cana energia são negativos ao processo de polpação e necessitam de mais estudos para o seu aprimoramento, tais como a baixa densidade básica e o elevado conteúdo de metais e extrativos.

ABSTRACT

CAETANO, Cássio Anderson Martins, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. Evaluation of the cane energy for cellulosic pulp production. Advisor: Fernando José Borges Gomes. Co-Advisor: Jorge Luiz Colodette.

The use of residual biomass from the agroindustry, rich in lignocellulosic materials, has aroused the interest of many industrial sectors such as pulp and sugarcane sector, for example. Among the various types of agricultural waste available, sugarcane bagasse stands out, the annual productivity of sugarcane is between 180-250 tons of total green matter per hectare, depending on the production environment. Still with respect to this type of biomass, the industries and research institutes have developed cane species with greater content of fibrous material, which is a recent innovation of this sector. The objective of this work was to characterize a sample of cane with high fiber content as to its density, chemical composition and pulping performance by the Soda-AQ process. The results of this study were compared with data from the literature regarding conventional sugarcane and eucalypt wood. The results obtained allow us to conclude that the fibrous cane has a potential for pulp production, presenting the following positive points: (1) low lignin content compared to wood; (2) higher carbohydrate content compared to wood; and (3) pulp yield were close to that reported for eucalyptus wood. However, some parameters of the fibrous cane are negative to the pulping process and require further studies for their improvement, such as low basic density and high contents of metal and extractives.

1. INTRODUÇÃO

As madeiras de coníferas e folhosas são as principais matérias primas para a produção de polpa celulósica em todo o mundo. Contudo, os custos dessas matérias primas têm apresentado tendências de crescimento, em especial pelo aumento do custo da terra e mão de obra (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010).

Nesse contexto, há uma crescente busca por novas matérias primas que possam ser utilizadas na produção de polpa celulósica, a custos viáveis de processo e que entreguem ao produto final as características desejadas no que tange a qualidade requerida pelo mercado (MORAIS, 1999).

Dentre as fontes alternativas de matéria prima, a cana energia por ser um material fibroso lignocelulósico, possui grande potencial de aplicação na indústria de celulose e papel, devido a sua composição química com elevado teor de holocelulose ($\approx 70\%$) e reduzidos teores de lignina ($\approx 20\%$) (CARASCHI et al., 1996; ANDRADE et al., 2014; BOECHAT, 2010).

Este vegetal é grandemente utilizado no Brasil pela indústria sucroalcooleira, a geração desses resíduos pelas indústrias é inevitável, sendo um dos mais representativos o bagaço. A cultura no país apresenta uma produtividade média de 85 toneladas por hectare, cada tonelada processada gera em torno de 140 kg do bagaço, base seca (CTC, 2012). Desse modo, por cada hectare de cana plantada são gerados em torno de 12 toneladas de bagaço. A área plantada de cana de açúcar hoje no Brasil é estimada em 9,05 milhões de hectares (CONAB, 2017).

Diante desse cenário, muitos foram os estudos que avaliaram a produção de polpa celulósica a partir dos resíduos da cana de açúcar oriundos da indústria sucroenergética (palha e bagaço de cana de açúcar). No que tange a evolução da produção de cana de açúcar, tem sido estudada uma nova espécie de cana que possua maior conteúdo de material fibroso ($\approx 26\%$) (MEIRELES, 2007), em comparação com as variedades comerciais em uso ($\approx 12\%$) (MARIANO, 2015). Essa nova variedade de cana de açúcar tem sido designada pela comunidade científica e industrial como cana energia. Para essa nova matéria prima ainda há carências de estudos de composição química e performance da polpação da mesma.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi o de investigar a composição química e a performance da polpação do bagaço de uma nova variedade de cana energia e avaliar a viabilidade do uso do bagaço dessa cana energia para a produção de polpa celulósica. Adicionalmente os dados obtidos nesse estudo serão confrontados com dados da literatura. Serão estudadas a branqueabilidade das polpas celulósicas obtidas nesse estudo de polpação e posteriormente os testes físicos-mecânicos da polpa para papéis.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Para a realização desse estudo, foram utilizadas amostras de bagaço da cana de açúcar spp. (*Saccharum officinarum* L.) provenientes de uma empresa brasileira que tem se dedicado ao desenvolvimento de variedades de cana com maior conteúdo de material fibroso, denominada nesse trabalho como cana energia. Para padronização da granulometria do bagaço da cana de açúcar utilizado foi realizado o fracionamento segundo a norma Scan 40:94 (utilizando-se peneira de 2 e 5 mm de abertura), seguida de classificação manual para remoção de finos. A fração retida na peneira de abertura 5 mm foi considerada como aceite e acondicionada em sacos de polietileno para conservação do teor de umidade e proteção contra ataques de organismos xilófagos.

3.2. Metodologia

3.2.1. Densidades básica e aparente do material

A análise de densidade básica da cana energia foi determinada pelo do método da balança hidrostática, descrito na norma ABNT-NBR 1194. A densidade aparente da cana energia foi determinada pelo método descrito na norma SCAN-CM 46:92.

3.2.2. Caracterização química

Para caracterização química, aproximadamente 500 g do bagaço da cana energia foram processados em um moinho de facas para produção de serragem. A serragem obtida foi então classificada de acordo com a norma TAPPI T257-cm85 e submetida à climatização em temperatura e umidade controladas (23 ± 1 °C, $50\pm 2\%$ UR) até alcançar a umidade de equilíbrio. As análises empregadas na caracterização química da amostra são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Procedimentos analíticos utilizados para a caracterização química da cana energia

Parâmetros	Procedimentos
Teor de extrativos totais	TAPPI T 264 cm-97
Teor de extrativos em acetona	TAPPI T280 pm-99
Teor de lignina solúvel	Goldschimid (1971)
Teor de lignina insolúvel	Gomide e Demuner (1986)
Teor de carboidratos*	Wallis <i>et al.</i> (1996)
Grupos acetila	Solar <i>et al.</i> (1987)
Ácidos urônicos	Scott (1979)
Cinzas	TAPPI 211 om-85
Teor de sílica	TAPPI 211 om-85
Metais**	TAPPI T 266 om-88
Análise elementar***	TAPPI Test T266 om-94

*Glicanas, xilanas, galactanas, mananas e arabinanas.

** Cálcio, cobre, ferro, magnésio, manganês, potássio e sódio.

*** Carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre.

3.2.3. Caracterização química polpação soda /antraquinona (SODA-AQ)

Os cozimentos Soda foram realizados em digestor rotativo *Regmed*[®], com 4 reatores individuais de 2 litros cada um, sendo o digestor aquecido eletricamente e dotado de termômetro e manômetro, possibilitando a realização, numa única batelada, de quatro cozimentos simultaneamente. O tempo e a temperatura de cozimento foram monitorados por meio de controlador eletrônico acoplado a um computador. As cargas de álcali foram selecionadas após realização de cozimentos exploratórios, objetivando obtenção de números *kappas* 21 (*Polpa A*) e 60 (*Polpa B*). Na Tabela 2 são apresentadas as condições de cozimentos utilizadas para todos os cozimentos exploratórios:

Tabela 2. Condições dos cozimentos para a cana energia

Parâmetros	Condições
Carga alcalina, %	*Variável
Relação Licor-biomassa, L/kg	5/1
Massa da biomassa, g a.s.	100
Tempo até temperatura, minutos	70
Tempo à temperatura, minutos	60
Temperatura máxima do cozimento, °C	165

* Carga alcalina e tempo à temperatura variáveis para atingir números kappa (21 e 60)

Após os cozimentos, as polpas celulósicas obtidas foram descarregadas dos reatores e lavadas com água em excesso à temperatura ambiente, utilizando tela de aço inox de 150 mesh. A individualização das fibras da cana energia foi realizada em “hidrapulper” laboratorial de 25 litros de capacidade, numa consistência de aproximadamente 0,6%. A depuração da polpa celulósica foi realizada em depurador laboratorial Voith, dotado de placa com fendas de 0,2mm. Os procedimentos analíticos para análises de polpas e licores foram usados conforme Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros determinados na polpa marrom e licores residuais resultante do processo dos cozimentos soda convencional

Parâmetro	Norma
Alvura	ISO 2470
Rendimento bruto	Gravimetria – Propriedade LCP
Depurado	Gravimetria – Propriedade LCP
Teor de rejeitos	Gravimetria – Propriedade LCP
Número kappa	TAPPI T236 cm-85
Viscosidade	SCAN CM 15:99
pH do licor negro	Tappi T211 om-93
Álcali efetivo residual do licor negro	SCAN N2:88
Formação de folhas manuais	Tappi T 218 sp-97
Holocelulose	TAPPI T 19 -54 (Fengel,1984)
Pentosanas	TAPPI T223 cm-84

3.2.4. Branqueamento

As polpas marrons resultantes dos cozimentos Soda-AQ com kappa 21 (Polpa A) foram submetidas ao branqueamento ECF, utilizando a sequência OD*(EP)DP, a fim de obter alvura de 90% ISO. As condições estabelecidas para cada estágio da sequência de branqueamento são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Condições estabelecidas para os estágios do branqueamento ECF da polpa obtida para kappa 21 (Polpa A)

Condição	O	D*	EP	D ₁	P
Consistência, %	11,5	11	11	11	11
Tempo, min	60	120	75	90	90
Temperatura, °C	100	90	85	80	80
Pressão, kPa	750	-	-	-	-
H ₂ SO ₄ , kg/tas	-	-	-	-	-
NaOH, kg/tas	18,0	-	8,0	-	25
O ₂ , kg/tas	15,0	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/tas	-	8,0	-	**variável	-
H ₂ O ₂ , kg/tas	-	-	4,4	-	25

** Dosagem variável para alcançar a alvura 87 % ISO.

O branqueamento com oxigênio foi realizado em um reator/misturador Quantum – Mark V, fabricado por Quantum Technologies, com amostras de 250 g a.s. (absolutamente seca) de polpa, sendo as condições gerais do branqueamento demonstradas na Tabela 4. A polpa foi depositada no reator, na consistência adequada, e aquecida até a temperatura desejada. Atingida a temperatura e sob o efeito de agitação constante, foi injetada a dosagem preestabelecida de NaOH ao sistema e aplicada a pressão de reação com O₂. Terminada a reação, foram extraídas amostras do licor residual para análise de pH. A polpa foi transferida para o descarregador de polpa e então lavada com equivalente a 9 m³ de água destilada por tonelada de polpa seca.

Os demais estágios de branqueamento foram realizados em saco de polietileno, utilizando ácido sulfúrico e hidróxido de sódio para ajuste de pH nos estágios ácidos (D* e D1) e alcalinos (EP e P), respectivamente. Foi homogeneizado e colocado em banho de vapor termostático na temperatura desejada. Ao final do tempo de reação, foram extraídas amostras de licor residual para análises de pH e residual de reagente. Em seguida, a polpa foi lavada com o equivalente a 9 cm³ de água destilada por grama de polpa absolutamente seca e após ser desaguada na centrífuga, foi armazenada em saco de polietileno.

3.2.5. Propriedades físico-mecânicas das polpas

As polpas branqueadas foram refinadas em moinho PFI, segundo a norma ABNT-NBR 14345, utilizando o equivalente a 30 g absolutamente seca de polpa, a 10% de consistência, nos níveis 0, 85, 170 e 250 revoluções. Posteriormente ao refino foram

formadas folhas com 60g/m² de gramatura em formador de folhas, utilizadas para análise de testes físicos. Essas folhas foram climatizadas nas condições de 23 ± 1°C de temperatura e 50 ± 1% de umidade relativa, por um período mínimo de 12 horas. Após o período de climatização foram realizados os ensaios físico-mecânicos apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Ensaios físico-mecânicos e ópticos e respectivos métodos de determinação

Parâmetro	Norma
Índice de arrebentamento	TAPPI T 403 om-97
Índice de rasgo	TAPPI T 414 om-98
Índice de tração	TAPPI T 494 om-96
Resistência à drenagem	TAPPI T536 om-96
Coeficiente de dispersão de luz	TAPPI T519 om-96
Opacidade	TAPPI T 519 om-96

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Densidades básica e aparente da biomassa

A densidade básica é um importante parâmetro para a determinação da qualidade da biomassa lignocelulósica destinada à produção de polpa celulósica, está diretamente relacionada às características de qualidade do produto final, assim como rendimento operacional do processo de produção (FOELKEL et al., 1992), bem como afeta os custos de transporte podendo limitar as distâncias de viabilidade econômica para o mesmo. A cana energia apresentou densidade básica média de 192 kg/m³, a qual é superior aos relatos encontrados na literatura para as variedades de cana-de-açúcar comumente utilizadas no Brasil, com valores médios de 92 kg/m³ (PEDRESCHI, 2009).

Na Tabela 6, é possível observar a comparação do bagaço de cana de açúcar com a madeira de eucalipto, principal matéria prima para a produção de polpa celulósica no Brasil, o valor da cana energia foi bem abaixo dos 480 kg/m³ encontrados para madeira industrial de eucalipto por (GOMES et al., 2015).

Estes valores apontam para desafios na utilização da biomassa oriunda do bagaço na indústria de polpa celulósica, pois para aumentar a sua viabilidade de processamento industrial, métodos de compactação da mesma devem ser considerados

antes do transporte, ou as plantas industriais devem ser planejadas próximas às fontes desse material.

Tabela 6. Densidade básica e aparente das biomassas de cana energia, cana de açúcar convencional e *Eucalyptus sp.*

Madeira	Densidade básica (kg/m ³)	Densidade aparente (kg/m ³)
<i>Cana energia</i>	192,0	134,0
* <i>Cana Convencional</i>	131,0	75,9
** <i>Eucalyptus sp.</i>	488,7	187,2

* Dados para a cana convencional foram extraídos de Carvalho, 2012.

** Dados para o Eucalyptus sp. foram extraídos de Gomes et al., 2015.

4.2. Caracterização química

A relação entre a composição química da biomassa lignocelulósica e a sua processabilidade tem sido bastante estudada no caso da utilização da mesma para a sua conversão em polpa celulósica, pois tendem a afetar o processo bem como a qualidade do produto final (GOMES et al., 2015).

Os resultados da composição química da cana energia, cana convencional e eucalipto estão apresentados na Tabela 7. O percentual de extrativos totais foi de 15,87 % este valor foi próximo ao encontrado no estudo de Carvalho et al (2012). A cana energia apresentou elevado teor de extrativos, os quais não são desejáveis para maioria dos processos industriais que utilizam a biomassa como matéria prima para a obtenção de materiais e bioprodutos. Canilha et al (2007) e Wolf (2011) encontraram para a cana-de-açúcar teores de extrativos de 4,1 e 4,9 %, respectivamente, utilizando como solvente o etanol. Marabezi (2009) relatou o teor de 2,9 % para cana no seu estudo. Os vários resultados relatados não são comparáveis com este estudo, pois utilizaram solventes e sequencias de solventes diferentes. Porém fica evidente o elevado teor de extrativo presente na cana energia.

No que diz respeito ao conteúdo de lignina, é desejável que este seja o menor possível para a produção de polpa celulósica (MARABEZI, 2009). Quanto ao conteúdo de lignina observado na amostra de cana energia, os valores podem ser considerados próximos a cana convencional. Contudo, os valores de lignina da cana de açúcar quando comparados ao eucalipto se mostraram inferiores. Outro aspecto de grande relevância é o conteúdo de carboidratos, onde o bagaço de cana de açúcar também apresentou

maiores conteúdos quando comparada a madeira. Entre as amostras de bagaço de cana de açúcar, a cana convencional apresentou maior conteúdo de açúcar quando comparado a cana energia, especialmente quanto ao conteúdo de xilanas.

Quanto ao conteúdo de grupos acetila e ácidos urônicos, a cana energia apresentou valor semelhante dos urônicos ao encontrado para a cana convencional e inferior aos reportados na literatura para a amostra de madeira de eucalipto. Já os grupos acetila, a cana energia apresentou valores inferior á cana convencional e próximo a madeira de eucalipto. Esse parâmetro é de interesse para a produção de polpa celulósica, uma vez que os grupos acetila tendem a consumir o álcali no processo de polpação aumentando a sua demanda; e os ácidos urônicos são convertidos a ácido hexenurônico durante o processo de polpação, o que não é desejável por contribuir para a instabilidade de alvura da polpa celulósica, entre outras desvantagens de processo, como por exemplo, consumo de reagentes de branqueamento, geração de metanol no sistema de recuperação química.

Tabela 7. Composição química da cana energia, cana convencional e eucalipto

Composição química, %	Cana energia	Cana convencional*	Eucalipto**
Extrativos Totais	15,76	15,0	-
Ext. em acetona	1,4	-	1,9
Lignina	Lignina Klason	19,5	26,0
	Lignina solúvel	2,6	4,3
Carboidratos	Lignina Total	22,5	30,3
	Glucanas	42,7	41,8
	Xilanas	20,0	24,8
	Galactanas	1,8	0,9
Ácidos Urônicos	Mananas	0,3	0,9
	Arabinanas	2,3	0,3
Grupos Acetila	1,2	1,5	4,0
	1,7	3,0	1,9

* Carvalho, 2012;

** Gomes et al., 2015.

4.2.1. Conteúdo de minerais e cinzas

O conteúdo de minerais presentes nas biomassas lignocelulósicas também é de grande relevância para a avaliação de seu uso na indústria de celulose e papel, uma vez que causam problemas operacionais, tais como corrosão, depósitos em equipamentos, consumo de reagentes de branqueamento, aumento da instabilidade da alvura da polpa, etc. Albert, (1995). Os conteúdos de minerais para as amostras de cana energia foram muito superiores aos relatados na literatura para espécies de cana de açúcar convencionais e madeira de eucalipto (Tabela 8).

Tabela 8. Análise dos minerais da cana energia comparados com dados obtidos na literatura para espécies de cana de açúcar convencional e eucalipto

Amostras	Minerais, mg/Kg							Cinzas %	Sílica %
	Ca	Na	Fe	Mn	Mg	Cu	K		
Cana energia	1.291,2	378,4	309,0	53,2	2.957,4	1959,3	378,4	4,1	2,1
*Cana convencional	431,0	-	163,0	30,3	686,0	2,26	3.185,0	2,3	1,4
** <i>Eucalyptus sp.</i>	281,3	580,3	11,2	10,6	106,2	2,4	375,0	0,2	0,07

* Dados para a cana convencional foram extraídos de Carvalho, 2012.

** Dados para o *Eucalyptus sp.* foram extraídos de Lima, 2016.

A cana energia possui compostos minerais que podem interferir na produtividade industrial e, quando se acumulam no processo, como por exemplo potássio e cálcio, são causadores de problemas como corrosões, incrustações e entupimentos e, portanto, reduzem a vida útil dos equipamentos. Parte destes contaminantes permanecem nos efluentes, nos resíduos sólidos e aéreos. Devido aos problemas que os elementos minerais podem causar nas linhas de produção, a sua quantificação torna-se útil para fornecer subsídios na escolha de medidas preventivas, uma vez que uma grande quantidade destes elementos minerais adentra as indústrias (WOLF, 2011).

4.2.2. Análise elementar

A biomassa é composta por elementos C, H, O, N, S e Cl, onde os três primeiros são os principais, representando até 97 a 99% da massa orgânica da biomassa. Na Tabela 9, a análise da composição elementar (C, H, N, S e O) da cana energia demonstraram valores próximos aos encontrados em amostras de cana de açúcar convencional e comparáveis com os valores observados para madeiras de eucalipto (CARVALHO, 2012). O nitrogênio da cana energia mostrou valor superior quando comparado à cana convencional. Já o enxofre do eucalipto mostrou valor superior a cana energia. O poder calorífico da cana energia mostrou-se ligeiramente inferior quando comparado a cana de açúcar convencional e à madeira de eucalipto, sendo que estas são propriedades importantes para uso desses materiais como fontes energéticas.

Tabela 9. Análise elementar, cinzas, sílica e poder calorífico da cana energia, cana convencional e *Eucalyptus sp.*

Amostra	Análise Elementar					PCs	PCI
	C, %	H, %	N, %	S, %	O, %	MJ/Kg	MJ/Kg
Cana energia	48,4	5,9	2,5	0,5	38,6	18,8	17,6
*Cana convencional	46,4	5,9	0,7	-	43,3	19,1	-
** <i>Eucalyptus sp.</i>	51,5	5,3	0,1	2,3	40,6	19,3	18,2

* Dados para a cana convencional foram extraídos de Carvalho, 2012.

** Dados para o *Eucalyptus sp.* foram extraídos de Lima, 2016.

Polpação Soda /Antraquinona (Soda-AQ)

Para a avaliação da performance de polpação da cana energia, a mesma foi realizada com o objetivo de se obter polpas de números kappas 21 e 60 (Polpa A e B), respectivamente valores estes escolhidos por serem comumente utilizados pelo setor industrial para a obtenção de polpas para a produção de papéis para a impressão e escrita (P&W) e embalagens (sackraft, cartões, etc.), que são reconhecidos como dois grandes mercados para o setor de celulose. Os resultados da polpação da cana energia são apresentados na Tabela 10. Para se atingir estes kappas houve uma variação da carga de álcali utilizada na polpação, sendo que quanto maior o nível de deslignificação, maior foi a demanda de álcali.

O parâmetro de grande importância para as indústrias produtoras de polpa celulósica é a eficiência de conversão da biomassa em polpa celulósica. Este pode ser analisado em termos de rendimento depurado (contempla somente fibras individualizadas), ou em termos de rendimento total (inclui fibras individualizadas e fragmentos não individualizados denominados rejeitos). Os dados obtidos nesse estudo apontam que a cana energia possui potencial de utilização para a produção de polpa celulósica quanto ao rendimento do processo. Os valores médios de rendimento depurado observados para as polpas de kappa 21 foi de 49,7 %, e quando estes dados são comparados ao processamento de outras espécies, tais como cana-de açúcar convencional (48,1%) e eucalipto kappa 20 valores na faixa de 50,0 a 51,6% pra quatro diferentes clones (GOMES et al., 2015), a performance da cana energia estudada pode ser considerada aceita para a produção de polpa celulósica, este vegetal resultou em percentual de rendimento comparável à cana convencional e à madeira de eucalipto.

Quanto as amostras obtidas em kappa 60 (Polpa B) é pertinente se comparar o rendimento total, pois em muitos casos há uma etapa de refinação em que os rejeitos são convertidos em frações de aceito (HART, 2006). Nesse cenário, as polpas celulósicas obtidas da cana energia obtiveram um rendimento total de 58,6%, valor ligeiramente inferior ao reportado por Bonfatti Júnior (2014) estudando deslignificação de um híbrido de eucalipto com número kappa próximo ao desse estudo (63,9) que obteve valores de rendimento total da ordem de 62,9%. Nesse contexto, é possível observar que a cana energia apresentou uma performance ligeiramente inferior, o que pode estar relacionado a fatores de composição química como elevados teores de minerais e extrativos, além de possuir lignina com características mais desafiadoras do que a madeira de eucalipto para o processo de polpação. É conhecido que as espécies de cana possuem estruturas p-hidroxifenil na sua lignina, que possui as posições 3 e 5 do anel livre para fazer ligações, podendo assim originar estruturas de lignina mais condensadas, e por conseguinte difíceis de deslignificar em comparação com a madeira de eucalipto que não possui essa estrutura (GOMES et al., 2008; ANDRADE, 2014).

Outro parâmetro comumente utilizado por setores acadêmicos e industriais para mensurar a qualidade da polpa celulósica é a viscosidade. Este parâmetro se correlacionasse com o grau de polimerização das cadeias de carboidratos presentes na polpa celulósica, podendo-se inferir se a mesma se encontra mais preservada ou degrada quando corretos parâmetros de análise são utilizados (NAVARRO, 2004). Nesse estudo, observou-se uma viscosidade média de 1.118 e 1.107 dm^3/kg para as Polpas A e B,

respectivamente. Para a Polpa A este valor está dentro das faixas reportadas na literatura para espécies de cana-de-açúcar e de madeira (ALENCAR, 2002). A menor viscosidade da Polpa B pode estar relacionado ao fato de que para se atingir kappas elevados, condições mais brandas de polpação são empregados, e que associado ao fato de se ter utilizado antraquinona, um maior teor de carboidratos de menor peso molecular possa ter sido preservado, o que contribuiu para o decréscimo da viscosidade (GOMES et al., 2015). Os resultados dos valores de alvura observado nesse estudo estão em coerência com a literatura para polpas obtidas por processos alcalinos, onde maiores valores de kappa resultam em menores alvuras (MOREIRA, 2010).

As pentosanas se correlacionam com o conteúdo de hemiceluloses, especialmente o de xilanas, por ser a principal hemicelulose dessas espécies. Nas polpas para papéis, a retenção das pentosanas é desejável, por aumentar o rendimento em polpa, diminuir a energia requerida na refinação e reduzir a densidade das folhas, aumentando algumas propriedades de resistência da polpa. O valor (23,6%) encontrada na amostra de cana energia obtidas apresentaram maiores teores de pentosanas que os lenhos dos vegetais convencionais. Segundo Ferreira et al (2006) o teor de pentosana variou de 13,2 a 16,4 % para clones de Eucaliptos. No estudo de Longue Júnior e Colodette (2011) encontraram um percentual de pentosanas (15,4 %) para espécie de eucalipto, este teor foi inferior ao encontrado neste estudo.

Tabela 10. Resultados da polpação Soda-AQ para a amostra de bagaço de cana de açúcar para as polpas kappa 21 e kappa 60

Amostra	AE	Rendimentos, %			Viscosidade, dcm ³ /kg	Alvura, %ISO
	(%)	Depurado	Rejeitos	Total		
Polpa A	21,0	49,7	1,0	50,6	1118	28,46
Polpa B	7,0	46,5	12,1	58,6	1107	16,70

4.2.3. Branqueamento

Para a investigação da performance do branqueamento, apenas a polpa de kappa 21 foi avaliada, isto por que polpas de kappas elevados, tais como o kappa 60, não são branqueadas comercialmente devido a elevada demanda de reagentes químicos necessários. A seguir serão apresentadas as performances da deslignificação com o oxigênio e da branqueabilidade da polpa de cana energia.

4.2.3.1. Deslignificação com oxigênio:

Ainda quanto ao processo de branqueamento da polpa celulósica oriunda da cana energia, a eficiência da deslignificação com oxigênio foi de 73,8%, o que proporcionou um ganho de alvura de 58,5%. Estes valores são em geral superiores aos observados para polpas de eucalipto, (COLODETTE et al 2015). Isso pode ser explicado pela possível baixa relação lignina/HexA das polpas oriundas da cana energia, uma vez que estas possuem menores teores de ácidos urônicos em sua composição e estes são os compostos que seriam derivados em ácidos hexenurônico durante o processo de polpação alcalina (COLODETTE et al., 2015). Portanto, por ser o oxigênio um oxidante nucleofílico, que sob condições alcalinas, promove a remoção da lignina, mas não reage com os grupos de ácidos hexenurônicos (VUORIEN et al., 1996), a eficiência desse estágio foi maior para a cana energia do que para polpas obtidas a partir de eucalipto (BOECHAT, 2010).

A cana energia teve baixo teor de ácido hexenurônicos (4,4 mmol/kg) quando comparado a polpa de eucalipto. Tem sido descrito na literatura que polpas celulósicas com menor conteúdo de HexA tendem a apresentar melhor performance na deslignificação com oxigênio (COLODETTE et al 2015). Essa tendência pode ser explicada pelo fato de que apenas pequenas quantidades de HexA são removidos durante a Pre-O₂, e continuam contribuindo para a composição do número kappa, o qual é o parâmetro utilizado (redução de kappa) para avaliar a performance deste estágio. Os ácidos hexenurônicos (HexA) são produtos da conversão do ácido 4-O-meiglicurônico presente nas xilanas, durante a polpação kraft (GOMES, 2009), e o fato da Pré-O₂ não possuir como característica a remoção de HexAs, tem sido documentada na literatura (COLODETTE et al 2015).

4.2.3.2. Branqueabilidade das polpas:

Nesse estudo, como previamente descrito na metodologia, as polpas foram branqueadas almejando-se uma alvura de 90% ISO. Para facilitar a análise dos dados e comparações com dados da literatura, utilizou-se a razão entre o valor do decréscimo do

kappa da polpa de entrada no branqueamento versus o kappa final da polpa pela demanda de reagentes químicos oxidantes mensuradas em termos de cloro ativo total (CAT) para se alcançar a alvura objetivo. O teor de cloro ativo total foi obtido pela Equação 1, onde os fatores 2,63 e 2,09 foram obtidos pela conversão de peróxido de hidrogênio e dióxido de cloro em cloro ativo baseado em seus equivalentes de oxidação.

$$\text{CAT (kg/t a.s)} = [(\text{ClO}_2 \times 2.63) + (\text{H}_2\text{O}_2 \times 2.09)]$$

(1)

De acordo com a literatura, a branqueabilidade das polpas celulósicas pode ser afetada pela matéria prima de origem, bem como pelo método utilizado na conversão da mesma em polpa (SJÖSTRÖM, 1992; MORAIS, 2008). Quando comparada a demanda de CAT da polpa oriunda da cana energia com a demanda para eucalipto (COLODETTE et al., 2002; PASCOAL NETO et al., 2002), observa-se que a tendência foi de maior consumo de químicos para a polpa de cana energia (Tabela 11). Este maior consumo de CAT pode ser explicado por diversas características presentes na cana energia em comparação com a madeira, tais como maiores teores de minerais e tipos de lignina, por exemplo. Contudo, é relevante observar que muitas das polpas reportadas na literatura utilizam matérias primas selecionadas para a produção de polpa celulósica, o que não ocorreu para a cana energia.

Tabela 11. Cloro ativo total para polpas de cana energia e *Eucalyptus* spp. para atingir uma alvura de 90 % ISO, utilizando-se polpas de kappa inicial e sequências de branqueamento similares

Amostra	CAT, kg/tas
Polpa A (nº kappa inicial 21)	70,7
<i>Eucalyptus</i> sp. (nº kappa inicial 20)	55,4

* Fonte : Gomes et al, 2013.

Outro fator que determina a qualidade da polpa celulósica são a viscosidade e a estabilidade de alvura. A viscosidade assim como na polpação é um parâmetro utilizado para inerir a qualidade da polpa quanto ao nível de degradação de seus carboidratos, o que pode comprometer suas propriedades de resistência mecânicas (COSTA e COLODETTE, 2007). Foi observado um valor de viscosidade da ordem de 580 dcm³/kg para a polpa de cana energia branqueada. Estes valores quando comparados a dados da

literatura são inferiores (GOMES et al, 2013). Esse resultado pode estar relacionado a maior demanda de químicos para se atingir a alvura previamente definida na metodologia, uma vez que é reconhecido que o processo de branqueamento também promove degradação dos carboidratos (DENCE e REEVE, 1996).

Já para a estabilidade de alvura, as polpas oriundas da cana energia, quando comparadas a literatura apresentaram valores próximo aos observados em outros estudos. Esse comportamento pode ser explicado pela elevada carga de CAT aplicada na polpa de cana energia, associada à sequência de branqueamento empregada, pois tem sido reportado que maiores dosagens CAT e estágios finais de peroxidação tendem a promover uma maior estabilidade de alvura da polpa (DENCE e REEVE, 1996).

Tabela 12. Dados de viscosidade e estabilidade de alvura obtidos para a polpa branqueada de cana energia para uma alvura de 90 % ISO, comparada com dados da literatura para polpas de kappas similares submetidas a mesma sequência de branqueamento

Amostra	Viscosidade, dm³/kg	Reversão de Alvura, % ISSO
Polpa A (nº kappa inicial 21)	580	2,3
<i>Eucalyptus sp.</i> (nº kappa inicial 20)*	760	2,2

* Fonte : Gomes et al, 2013.

4.2.4. Propriedades físico-mecânicas das polpas

4.2.4.1. Refinabilidade das Polpas

O parâmetro refinabilidade foi considerado nesse estudo como sendo a quantidade de energia mensurada em W.h. necessária para se alcançar um determinado grau de resistência da polpa à drenagem medido pelo °SR (Figura 1). Este parâmetro é de grande relevância para o uso da polpa celulósica destinado a produção de papéis, pois é conhecido que o refino é uma etapa que demanda grande consumo de energia, sendo um importante item na composição de custos para a fabricação de papéis (MOREIRA, 2006).

É possível observar que as Polpas A e B apresentaram tendências de refinabilidade diferentes, o que era esperado, por serem matérias primas de características distintas quanto a sua composição e processamentos realizados (branqueada e não branqueada, respectivamente). A Polpa B (maior kappa) mostrou melhor tendência de refinação, o que pode ser atribuído a sua maior rigidez e maiores

teores de hemiceluloses. As hemiceluloses diminuem a intensidade de refino necessário para se obter determinada valor de propriedade de resistência. Além de contribuir com a formação de ligações interfibras, as hemiceluloses presentes na polpa B quando comparado com a Polpa A facilitaram a hidratação das fibras, tornando-as mais susceptíveis ao refino. Segundo Foelkei (2009) , as hemiceluloses tornam as polpas mais fáceis de serem refinadas, tornando menor o consumo de energia para serem refinadas.

Analisando os dados obtidos nesse estudo com dados da literatura para polpas branqueadas, foi possível observar que os valores de energia consumidos para a Polpa A são em geral menores do que os reportados para polpas branqueadas oriundas de eucalipto (ABRANCHES, 2017; FARIA, 2016; LIMA, 2016; GOMES, 2010), o que pode estar relacionado ao maior conteúdo de hemiceluloses nas espécies de cana quando comparado a madeira. Em geral, para se atingir 40°SR houve um consumo médio variou de 40-60W.h. Utilizando um grau Schopper-Riegler elevado (40°SR) implica em maior resistência á drenagem da polpa e também maior índices de tração.

Porém, quando comparadas a polpas branqueadas obtidas a partir de bagaço de cana-de-açúcar convencional, os valores observados para a cana energia foram maiores que os reportados na literatura, onde para se obter 40°SR o consumo de energia foi da ordem de 13-20W.h (ANDRADE, 2014). Já para a polpa de kappa mais elevado (Polpa B), os valores reportados na literatura para polpas de madeira de folhosas variam de 40 a 80 W.h. (LUMIAINEN, 2000). Quando comparamos as duas polpas (A) e polpa (B) verificamos que a polpa (B) não branqueada gasta maior

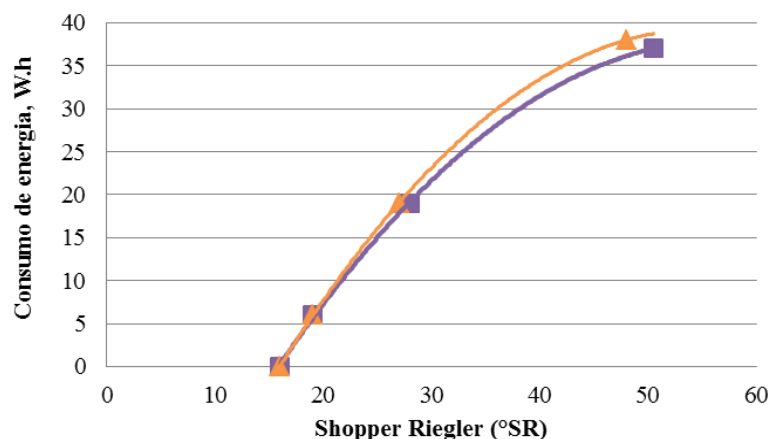


Figura 1. Consumo de energia versus °SR para as polpas submetidas ao processo de refino. Onde: Linha Laranja, polpa branqueada, Polpa A; e Linha Roxa, polpa marrom Polpa B.

4.2.4.1. *Propriedades de resistência das polpas*

Quanto as propriedades de resistência físico-mecânica das polpas avaliadas observou-se comportamentos diferentes entre a Polpa A e a Polpa B, derivado novamente de suas diferenças de composição química e processos de obtenção (Figura 2). No que tange a Polpa A (κ 21), essa mostrou tendências em apresentar menores valores de resistência físico-mecânica quando comparada a polpas branqueadas de eucalipto (ABRANCHES, 2017; FARIA, 2016; GOMES, 2010), onde os valores para índice de rasgo, tração e arrebentamento a 40°SR são da ordem de 10-12 mNm²/g, 50-80 Nm/g e 4-6 KPa.m²/g, respectivamente. Quando comparada a polpas branqueadas de bagaço de cana-de-açúcar convencional os valores observados para a cana energia foram também inferiores que os reportados na literatura, onde para se obter 40°SR os valores para índice de rasgo, tração e arrebentamento reportados foram da ordem de 8-9 mNm²/g, 60-70 Nm/g e 2,5-3 KPa.m²/g, respectivamente (ANDRADE, 2014).

Quanto a Polpa B, os valores observados são também inferiores aos reportados na literatura para papeis de oriundos de polpas de κ mais elevados destinados a embalagens os valores para índice de rasgo, tração e arrebentamento são da ordem de 6-22 mNm²/g, 50-90 Nm/g e 2-6 KPa.m²/g, respectivamente (LUMIAINEN, 2000).

A polpa B (não branqueada) quando comparado com a polpa A (branqueada) com maior teor de xilana na polpa, a energia gasta durante o refino do material celulósico diminui, uma vez que as xilanas exercem influencia positiva sobre o

intumescimento, hidratação e flexibilidade da fibra e, conseqüentemente, favorecem o refino.

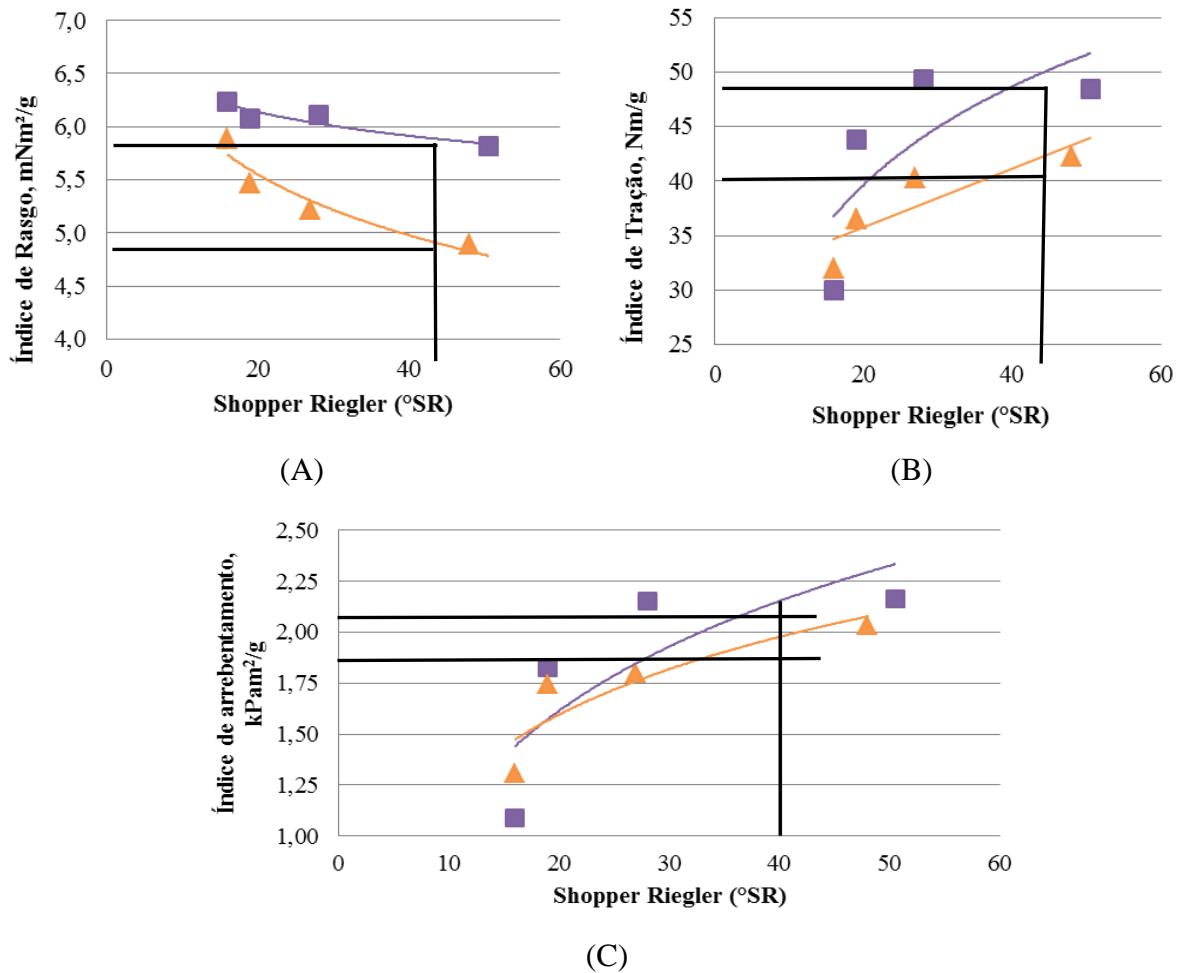


Figura 2. Curvas das propriedades de resistência físico-mecânica das polpas estudadas em relação a intensidade de refinamento mensurada pelo °SR, sendo: (A) índice de rasgo; (B) índice de tração; e (C) índice de arrebentamento. Onde: Linha Laranja, polpa branqueada, Polpa A; e Linha Roxa, polpa marrom Polpa B.

4.2.5. Propriedades ópticas

As propriedades ópticas são relevantes para a adequação da qualidade dos papéis principalmente para aqueles destinados à impressão e escrita (P&W). Na estrutura da folha de papel há elementos que formam interfaces entre si e o ar, e quando uma luz é incidida nesse conjunto, ela é refletida, dispersa e absorvida, sendo esses os fenômenos

responsáveis pela propriedade óptica do papel (CARPIM et al., 1987; SALVADOR et al., 2000). Para este parâmetro somente as polpas branqueadas foram analisadas, uma vez que estas são destinadas a segmentos P&W (Figura 3). Quando comparado a dados da literatura para madeira de folhosas, onde os valores para opacidade e coeficiente de dispersão de luz a 40°SR são da ordem de 60-70 % e 30-35 m²/kg, respectivamente (ABRANCHES, 2017; FARIA, 2016; LIMA, 2016; GOMES, 2010). Quando comparada a polpas branqueadas de bagaço de cana-de-açúcar convencional os valores observados para a cana energia foram também inferiores que os reportados na literatura, onde para se obter 40°SR os valores para opacidade e coeficiente de dispersão de luz reportados foram da ordem 68-70 % e 24-27m²/kg, respectivamente (ANDRADE, 2014).

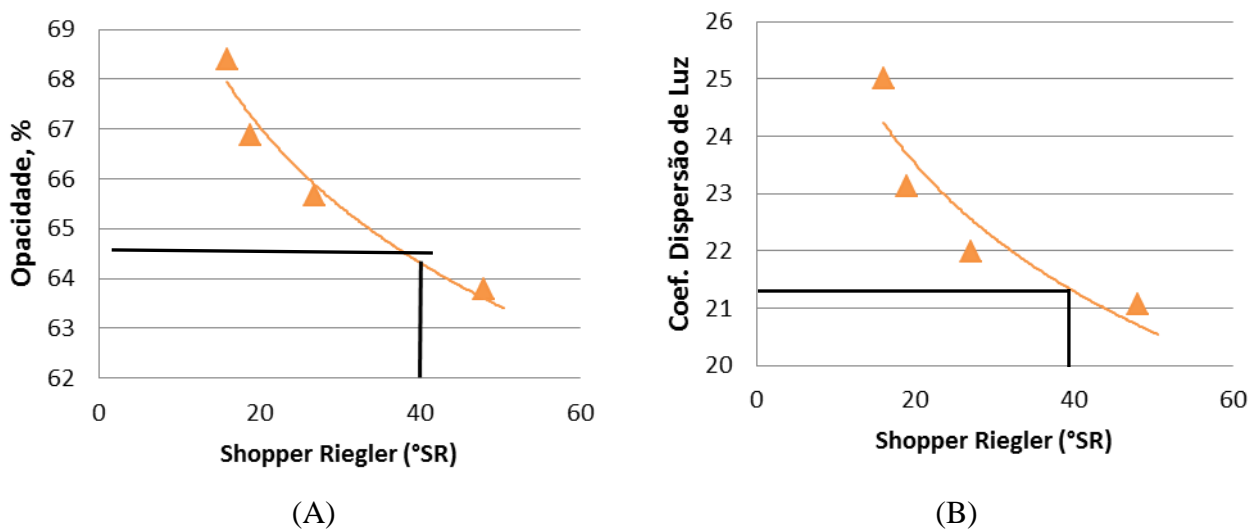


Figura 3. Curvas das propriedades ópticas de polpas de cana energia branqueadas, sendo: (A) opacidade; e (B) coeficiente de dispersão de luz.

5. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos nesse estudo, foi possível obter a caracterização físico-química do bagaço da cana energia, que se mostrou atrativo para a produção de polpa celulósica devido ao seu alto teor de carboidratos e reduzidos teores de lignina, quando comparado a madeira. Contudo, essa matéria prima ainda apresenta características que devem ser melhoradas visando-se o seu uso para o setor de celulose, tais como baixa densidade e elevados teores de minerais e extrativos.

A conversão da cana energia em polpa celulósica se mostrou viável para os dois níveis de kappas avaliados. A Polpa A (kappa 21) atingiu a alvura desejada, porém demandando elevado consumo de reagentes químicos no branqueamento foi observada. Quanto as propriedades das físico-mecânica das polpas (Polpa A e B), em geral, estas foram inferiores às observadas para polpas oriundas de madeiras de eucalipto e do bagaço de cana-de-açúcar convencional.

6. REFERÊNCIAS

ABRANCHES, W. P. O. Efeito do álcali efetivo residual na produção de polpa kraft branqueada de eucalipto Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Viçosa, 38p., 2017.

ALBERT, R. J. Worldwide status of effluent-free technology for bleached kraft pulp production. In: INTERNATIONAL NON-CHLORINE BLEACHING CONFERENCE, 1995 [s.l.], 1995. 37 p.

ALENCAR, G. S. B. Estudo da qualidade da madeira para produção de celulose relacionada à precocidade na seleção de híbrido *E. grandis* x *E. urophylla*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 145p. 2002.

BOECHAT, J.B. Produção de papel tissue a partir de bagaço de cana.2010.61f. Dissertação (Especialização *Latu Sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2010.

BONFATTI JÚNIOR, E.A. Deslignificação com oxigênio para polpa kraft com alto número kappa. 2014. 116 f. Dissertação (mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CANILHA, L.; CARVALHO, W.; ROCHA, G. J. M.; ALMEIDA, E.; SILVA, J. B.; GIULIETTI, M. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar in natura, extraído com etanol ou ciclohexano/etanol. In: ABQ – RN, 2007, Natal. Anais eletrônicos... Natal: ABQ – RN, 2007. Disponível em: . Acesso em: junho, 2018.

CARASCHI, J. C.; CAMPANA FILHO, S. P.; CURVELO, A. A. S. Preparação e caracterização de polpas para dissolução obtidas a partir de bagaço de cana-de-açúcar. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, jul./set. (1996)

CARPIM, M. A.; BARRICHELO, L. E. G.; CLAUDIO-DA-SILVA JR, E.; VASCONCELOS DIAS, R. L. A influência do número de fibras por grama nas propriedades óticas do papel. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, 20, SÃO PAULO, 1987. Anais... São Paulo: ABTCP, 1987. p.183-205.

CARVALHO, D.M. (2012). Evaluation of the Ethanol – Soda Cooking for Sugar Cane Bagasse and Straw, 2012. 150f. Master thesis – University of de Viçosa, Viçosa, MG.

CARVALHO, D.M., “Caracterização físico-química e polpação etanol/soda do bagaço e da palha da cana de açúcar. ” 2012. 165f. Dissertação (Mestrado em ciência florestal) UFV. Viçosa, MG. (2012).

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, D. M. Composição química de materiais lignocelulósicos. IN: COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B. Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado. Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2015, p.31-58.

COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L. GIRARD, R.; JÄÄSKELÄINEN, A.; ARGYROPOULOS, D. S. Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality and bleachability. Tappi Journal, v. 1, n. 1, p. 14-20, 2002.

COLODETTE, J. L.; MARTINO, D. C. Deslignificação com oxigênio. IN: COLODETTE, J. L., GOMES, F. J. B. Branqueamento de Polpa Celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado. Ed. UFV, Viçosa, Minas Gerais, 2015, p.267-312

COSTA, M. M.; COLODETTE, J. L. The impact of kappa number composition on eucalyptus kraft pulp bleachability. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 24, n. 1, p. 61-71, 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em 03 fev. (2017)

CTC. Centro de Tecnologia Canavieira. Disponível em: <<http://www.ctcanavieira.com.br/>>. Acesso em 28 jan. (2012)

DENCE, C.W.; REEVE, D.W., Pulping Bleaching: Principles and Practice. Atlanta: Tappi. 1996.

FARIA, B. F. H. Produção e avaliação tecnológica da celulose e papel obtidas de misturas de cavacos de Eucalyptus sp. e Pinus sp. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Viçosa, 89p., 2016.

FOELKEL, C., MORA, E., MENOCELLI, S., “Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade de eucalipto para produção de celulose”. O papel, São Paulo, v.53, n.5, p.5. (1992)

GOMES, B.L., Martelli, F.H., e Silva, W.T.L. “Caracterização físico-química e morfológica da biomassa de capim-elefante, capim-moçamba, sorgo-Embrapa e bagaço de cana-de-açúcar,” III Symposium on agricultural and agroindustrial waste management., São Pedro, SP-Brazil. (2013)

GOMES, F. J. B. Aperfeiçoamento do branqueamento de polpa kraft da mistura de madeira de Pinus spp. e Eucalyptus spp. pela sequência OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal de Viçosa, 147p., 2010.

GOMES, F. J. B. et al. Influência do teor e da relação S/G da lignina da madeira no desempenho da polpação Kraft. O Papel, São Paulo, v. 69, n. 12, p. 95-105, dez. 2008.

GOMES, F. J. B., D.Sc., Estudos de caracterização e desconstrução de biomassas de eucalipto e capim elefante para aplicações em biorrefinarias integradas à indústria de

celulose. Orientador: Jorge Luiz Colodette. Coorientadores: José Lívio Gomide e Rubens Chaves de Oliveira, Universidade Federal de Viçosa, Dezembro, 2013.

GOMES, F.A. Avaliação dos processos kraft convencional e Lo-Solids para madeira de *Pinus taeda*. Piracicaba, 2009, 99p.: II.

GOMES, F.J.B., COLODETTE, J.L., “Branqueamento de polpa celulósica: da produção da polpa marrom ao produto acabado” Viçosa, MG. Ed. UFV. (2015)

GOMES, F.J.B.; COLODETTE, J.L.; MILANEZ, A. F.; RIO, J. C.; MUGUET, M. C. S.; Batalha, Larisse Ap. Ribas Evaluation of alkaline deconstructon processes for Brazilian new generation of eucalypt clones. *Industrial Crops and Products* (Print). , v.X, p.X - , 2014.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A.J. Estratégia de análise da qualidade da madeira de *Eucalyptus* sp para produção de celulose kraft. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.34, n.2, p.339-344, 2010

HART, Peter; CONNEL, Daniel. O efeito do número kappa do digestor na capacidade de branqueamento e rendimento de celulose de fibra longa EMCCTM, *O Papel*, São Paulo: ABTCP, v. 67, n. 11, p. 2 -13, nov. 2006. Disponível em: <http://www.revistaopapel.org.br/noticiaanexos/1311963631_23bdb513652b7a571abced9c1f50955b_204570738.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2014.

LONGUE JÚNIOR,D., COLODETTE, J,L. Remoção de Hemicelulose da madeira por tratamento de auto-hidrólise . *Ciência Florestal*

LUMIAINEN, J. Chapter 4: refining of chemical pulp. In: *Papermaking science and Technology. Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End*, vol. 8, Fapet Oy, Helsinki, p.86., 2000.

MARABEZI, K. Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores da lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar. 2009.142f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físico-Químicas) – Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

MARIANO, E., “Predição da necessidade de fertilizante nitrogenado pela cana-de-açúcar e reações do nitrogênio orgânico e mineral dissolvidos em palha e solo de canaviais” Tese de doutorado pela Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, SP. (2015)

MORAIS, L.C.; Estudos sobre a preparação e caracterização de materiais absorventes a partir dos polissacarídeos quitina e celulose. São Carlos, 97p. Dissertação apresentada Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo (1999).

MORAIS, P. H. D. Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e polpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa. 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, 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.

MOREIRA, F. K. V. Desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos biodegradáveis a partir de pectina, amido e nanofibras de celulose. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos , UFSCar, 2010

NAVARRO, R. M. S. 2004. Estudo dos diferentes tipos de processos de branqueamento de celulose objetivando a comparação entre seus métodos e a geração do potencial de poluentes em seus respectivos efluentes. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.

PEDRESCHI, R., “Aproveitamento do bagaço de cana da indústria sucroalcooleira na produção de painéis aglomerados” Tese de doutorado pela Universidade Federal de Lavras. Lavras, MG. (2009)

SALVADOR, E.; OLIVEIRA, R. C.; COLODETTE, J . L.; GOMIDE, J. L. Efeito da deslignificação com oxigênio nas propriedades físico-mecânicas de polpas kraft. In: CONGRESSO ANUAL DA ABTCP, SÃO PAULO, 2000. Anais... São Paulo: ABTCP, 2000. 24p.

SJÖSTRÖM, E., The behaviour of wood polysaccharides during alkaline pulping process. Tappi J., v.60, n.9, p.151, 1992.

WOLF, L.S. 2011. Pré-tratamento organossolve do bagaço da cana-de-açúcar para a produção de etanol e obtenção de xiloligômeros. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química na área de Pesquisa e Desenvolvimento de processos químico)- Universidade Federal de São Carlos.

APÊNDICE

Densidades e constituições químicas das amostras de Cana energia

Amostra	Repetição	Densidade Básica, kg/m ³	Densidade Aparente, kg/m ³
Cana energia	A	182	138
	B	202	130
	Média	192	134

COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Composição química de carboidratos, expresso em % base amostra seca.																
Amostra	Rep.	Ext. em acetona, %	Cinzas, %	Silica, %	Lignina, %			Teor de grupos acetilas (%)	Total de ácidos urônicos (%)	Carboidratos, %						
					Ins.	Sol.	Total			Arab	Gal	Glic	Xil	Man	Celulose	Hemicelulose
Cana energia	A	1.3	3.9	2.0	19.8	2.6	22.4	1.6	1.0	2.3	1.8	42.9	20.1	0.3	42.6	24.8
	B	1.5	3.9	2.0	19.9	2.5	22.4	1.8	1.3	2.3	1.8	42.5	19.9	0.3	42.2	24.6
	Média	1.4	3.9	2.0	19.9	2.6	22.4	1.7	1.2	2.3	1.8	42.7	20.0	0.3	42.4	24.7

EXTRATIVO TOTAL

Amostra	Peso	Cadinho		Cadinho + Amostra	amostra sem ext.	Extrativo	Média
		número	Peso				
Cana energia	1,6356	8	60,4100	61,7860	1,3760	15,87	15,76
	1,6356	12	44,6482	46,0280	1,3798	15,64	

ANÁLISE ELEMENTAR E MINERAIS

Amostra	Repetição	Análise Elementar					Cinzas, %	Sílica, %	PCs, MJ/Kg	PCI, MJ/Kg
		C, %	H, %	N, %	S, %	O, %				
Cana energia	A	48,4	5,9	2,1	0,4	38,5	4,1	2,1	18,9	17,7
	B	48,3	5,9	2,1	0,5	38,6	4,1	2,1	18,6	17,4
	Média	48,4	5,9	2,5	0,5	38,6	4,1	2,1	18,8	17,6

METAIS (Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, K e Na)

Amostra	Minerais							
	Repetição	Ca, mg/Kg	Fe, mg/Kg	Mn, mg/Kg	Mg, mg/Kg	Cu, mg/Kg	K, mg/Kg	Na, mg/Kg
Cana energia	A	1305,9	305,6	56,1	2944,2	1978,4	385,4	275,3
	B	1276,5	312,3	50,3	2970,5	1940,1	371,3	264,2
	Média	1291,2	309,0	53,2	2957,4	1959,3	378,4	269,8

COZIMENTOS AQ.: 0,1%

Condições de cozimento da cana energia

Condições cozimento	Processo SODA / AQ (0,1%) Kappa 21,0	Processo SODA / AQ (0,1%) Kappa 60,0
AE, %	11,0	7,0
Temperatura	165 °C	165 °C
Tempo até temperatura	70 min	70 min
Tempo à temperatura	60 min	60 min
Relação licor/biomassa	5:1	5:1
AQ	0,1%	0,1%

Amostra #	Repetição	AE (%)	AQ (%)	Número Kappa	Rendimentos, %			Licor Negro
					Depurado	Rejeitos	Total	pH
CANA ENERGIA KAPPA 21,0	A	11,0	0,10	21,2	49,4	0,7	50,1	10,9
	B	//	//	21,4	49,9	1,2	51,1	10,9
	Média	11,0	0,10	21,3	49,7	1,0	50,6	10,9
CANA ENERGIA KAPPA 60,0	A	7,0	0,10	59,4	46,6	12,6	59,2	9,2
	B	//	//	60,3	46,3	11,6	57,9	9,2
	Média	7,0	0,10	59,9	46,5	12,1	58,6	9,2

CONDIÇÕES BRANQUEAMENTO DAS POLPAS DA CANA ENERGIA, KAPPA 21,0

Condições	Cana energia (Kappa 21,0)				
	O/O	D*	(EP)	D ₁	Pf
Consistência, %	11,5	11,0	11,0	11,0	11,0
Temperatura, °C	100	90	85	80	80
Tempo, min	60	120	75	90	90
Pressão, kPa	750	-	-	-	-
O ₂ , kg/odt	15	-	-	-	-
ClO ₂ , kg/odt	-	8,0	-	12,0	-
H ₂ O ₂ , kg/odt	-	-	4,4	-	25,0
NaOH, kg/odt	18,0	-	8,0	-	25,0
H ₂ SO ₄ , kg/odt	-	2,0	-	2,5	-
Kappa	-	-	-	-	-
Número de Permanganato	5,5	-	2,0	-	0,7
Final pH	10,5	3,3	11,0	4,2	11,6
Reagente Consumido, %	-	100,0	99,2	93,1	99,0
¹ Alvura, % ISO	31,0	-	55,4	-	90,0
² Reversão de Alvura., % ISO	-	-	-	-	87,3
³ Reversão % ISO	-	-	-	-	-
Viscosidade, mPa.s	989	-	930	-	580
HexAs, mmol/kg de polpa	-	-	-	-	4,4