



# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

## QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO COM RESÍDUOS SÓLIDOS DE EUCALIPTO EM SISTEMA FORNO-FORNALHA

Alaor Coelho Silva<sup>1</sup>  
Marina Donária Chaves Arantes<sup>1</sup>  
Wendel Sandro de Paula Andrade<sup>1</sup>  
Lourdes Maria Hilgert Santos<sup>1</sup>  
Maria Naruna Felix de Almeida<sup>1</sup>  
Daniela Minini<sup>1</sup>  
Jaily Kerller Batista de Andrade<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira



# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

## QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO COM RESÍDUOS SÓLIDOS DE EUCALIPTO EM SISTEMA FORNO-FORNALHA

**Resumo:** O aproveitamento e a adequada destinação dos resíduos têm se tornado uma necessidade constante nas indústrias madeireiras. A carbonização surge como uma alternativa ambientalmente interessante, visto que utiliza um sistema forno-fornalha, que possibilita a queima de gases gerados durante o processo de carbonização. Este estudo teve como objetivo analisar a qualidade do carvão vegetal produzido a partir da carbonização de resíduos de *Eucalyptus* spp., em forno modelo (MF1-UFV). O carvão vegetal analisado foi obtido a partir de três carbonizações, realizadas após a instalação do sistema forno-fornalha. Foram avaliadas as propriedades dos resíduos utilizados nas carbonizações, bem como o rendimento gravimétrico do carvão e suas propriedades físicas e químicas. Para os resíduos sólidos de eucalipto, a densidade básica média foi de  $523 \text{ kg m}^{-3}$ , o poder calorífico de  $4512 \text{ kcal kg}^{-1}$ , o teor de extrativos de 4,99%, e o teor de lignina total de 26,5%. O rendimento gravimétrico médio do carvão foi de 32,72% (base seca), a densidade média aparente foi de  $317 \text{ kg m}^{-3}$ ; o poder calorífico foi de  $7959 \text{ kJ kg}^{-1}$ ; teor de cinzas de 0,65% e carbono fixo de 28,63%. Por meio das análises das propriedades do carvão, foi possível verificar sua qualidade e potencial para comercialização e uso em churrascarias, padarias, pizzarias e indústrias.

**Palavras-chave:** Resíduos de eucalipto, carbonização, queima de gases.

## QUALITY OF CHARCOAL PRODUCED WITH EUCALYPTUS SOLID WASTE IN KILN-FURNACE SYSTEM

**Abstract:** The use and proper disposal of waste has become a constant necessity in the timber industries. Carbonization appears as an environmentally interesting alternative, since it uses a kiln-furnace system, which allows the burning of gases generated during the carbonization process. The objective of this study was to analyze the quality of charcoal produced from the carbonization of residues of *Eucalyptus* spp., in model kiln (MF1-UFV). The analyzed charcoal was obtained from three carbonizations, carried out after the kiln-furnace system was installed. The properties of the residues used in the carbonization were evaluated, just as the gravimetric yield of the charcoal and its physical and chemical properties. For solid eucalypt waste, the average basic density was  $523 \text{ kg m}^{-3}$ , the calorific value was  $4512 \text{ kcal kg}^{-1}$ , the extractive content was 4.99%, and the total lignin content was 26.5%. The average gravimetric yield of the charcoal was 32.72% (dry basis), the apparent average density was  $317 \text{ kg m}^{-3}$ , the calorific value was  $7959 \text{ kJ kg}^{-1}$ , ash content of 0.65% and fixed carbon of 28.63%. Through the analyzes of the properties of charcoal, it was possible to verify their quality and potential for commercialization and use in steak houses, bakeries, pizzerias and industries.

**Keywords:** Waste of eucalyptus, carbonization, gas flaring.

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduo sólido é todo objeto descartado no estado sólido ou semissólido, resultante de alguma atividade humana na sociedade (BRASIL, 2010). Grande parte dos resíduos madeireiros são gerados pelo processo de usinagem em serrarias, em que o percentual produzido varia conforme o tipo de processo empregado, nível tecnológico, tipo de matéria-prima e do produto final obtido (HILLING et al., 2006).

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





# III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

Como consequência do baixo investimento em tecnologia e profissionais qualificados, o rendimento nas indústrias madeireiras é baixo, gerando uma grande quantidade de resíduos. O não tratamento ou a adoção de procedimentos inadequados para o que é descartado por essas empresas podem trazer danos tanto ao ambiente quanto à saúde humana.

Sendo assim, uma alternativa para o aproveitamento de resíduos oriundos de indústrias madeireiras é a geração de energia térmica e elétrica a partir da sua biomassa, visto que apenas uma parcela dos resíduos são aproveitados para algum fim econômico, social e/ou ambiental. Quirino (2002) relata que para transformar os resíduos em energia existem diferentes métodos, destacando-se a combustão direta, gaseificação e carbonização.

A carbonização constitui um processo de transformação térmica da madeira, conduzido em um ambiente com o controle de oxigênio ou ausência do mesmo, gerando uma porção sólida e outra gasosa (ALMEIDA; REZENDE, 1982), constituindo uma boa alternativa para a redução dos resíduos madeireiros.

Nas últimas décadas, o setor siderúrgico brasileiro vem buscando a modernização e melhoria no processo produtivo de carvão vegetal, por meio da confecção de fornos com tecnologias de baixo custo de aquisição, os quais venham aumentar o rendimento em produção e a qualidade do carvão vegetal produzido, bem como reduzir a poluição ambiental (CARDOSO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2013).

Um exemplo de nova tecnologia empregada para o processo de carbonização da madeira é o sistema forno-fornalha, o qual é equipado pelo forno de carbonização e o queimador ou fornalha (OLIVEIRA, 2012). Em seus estudos, Cardoso (2010) verificou que este sistema proporciona um rendimento gravimétrico do carvão de 29%, geração de atíço e finos em torno de 4% e redução em 97% e 94% na emissão de metano e monóxido de carbono, respectivamente, com a utilização da fornalha.

Ao optar pela implantação de um sistema de carbonização forno-fornalha, a indústria madeireira tem a possibilidade de agregar valor a um material que seria descartado, por meio da produção de carvão vegetal. Além disso, é possível associar a preservação do ambiente à essa atividade, visto que os resíduos madeireiros não serão mais depositados em terrenos baldios ou queimados sem nenhum controle.

Dentro desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos sólidos de eucalipto em sistema forno-fornalha, por meio de análises físicas, químicas e energéticas da madeira e do carvão obtido, bem como determinar os rendimentos gravimétricos do processo de carbonização.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização dos resíduos sólidos de eucalipto

O material experimental consistiu em resíduos sólidos de eucalipto de diferentes espécies (*Corymbia citriodora*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis*, e outros), os quais foram originados de toretes descartados da indústria de preservação, oriundos do ajuste de comprimento das toras a serem tratadas, e também de toras com alta tortuosidade ou diâmetro inferior ao comercializado pela empresa.

O forno utilizado para a carbonização comporta aproximadamente 4300 kg de madeira. Para a caracterização e determinação das propriedades físicas e químicas dos resíduos sólidos de eucalipto, foram amostrados cinco toretes de madeira representativos para cada

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





carbonização, heterogêneos em espécie e diâmetro, sendo assim capazes de representar o carregamento do forno. Os toretes foram levados à marcenaria do DCFM/CCAUE/UFES, onde retirou-se três discos da parte central de cada um, com três centímetros de espessura, sendo posteriormente separados e identificados dois pares de cunhas opostas de cada disco. Para determinação da densidade média da madeira destinada para as carbonizações foi utilizado um par de cunhas dos discos respectivos de cada torete. Para análise química da madeira, as cunhas restantes dos cinco toretes foram trituradas, homogeneizadas, de modo a se obter uma amostra composta (Figura 1).

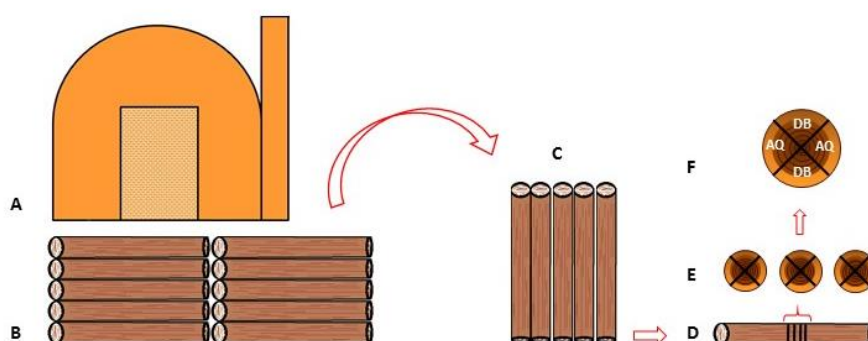


Figura 1. Esquema ilustrativo de amostragem. A) Forno-fornalha; B) Pilha de madeira utilizada para cada carbonização; C) Cinco toretes retirados da pilha; D) Posição de retirada dos discos; E) Confeção das cunhas; e F) Destinação das cunhas para análises (DB = densidade básica e AQ = análise química).

Fonte: Os autores.

Os procedimentos para análise das propriedades da madeira seguiram a Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003). Efetuou-se a saturação das cunhas por meio de imersão em água até massa constante, e o volume saturado das mesmas foi determinado por método do deslocamento de água. Posteriormente, o material foi acondicionado em estufa a  $103^{\circ}\text{C} (\pm 3^{\circ}\text{C})$ , até atingir massa constante, sendo a densidade básica da madeira determinada pela relação entre a massa seca e o volume saturado das cunhas.

Para a análise química da madeira, seguiram-se os procedimentos descritos pela norma *Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI T257 cm-02* (2002). A determinação do teor de extrativos seguiu as especificações da norma TAPPI T264 cm-97 (1997). O teor de lignina solúvel e insolúvel foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986) e Goldschimid (1971). O teor de cinzas e o poder calorífico superior da madeira foram determinados seguindo as normas da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP M-11/77 (1974), e NBR 8633 da ABNT (1983a), respectivamente.

## 2.2 Processo de carbonização, amostragem e caracterização do carvão vegetal

O estudo foi realizado utilizando um forno de produção de carvão vegetal modelo MF1-UFV, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira/CCAUE/UFES e



## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

instalado junto à empresa BBM – Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda, a qual está localizada na Fazenda São Francisco, no município de Alegre, Espírito Santo, Brasil.

Foram realizadas três carbonizações dos resíduos sólidos de eucalipto, após a instalação do sistema forno-fornalha. O carregamento do forno foi manual, com peças de madeira de até 1,5 metros de comprimento e diâmetro variável, sendo dispostas verticalmente em seu interior. A madeira utilizada nas carbonizações foi pesada em uma balança digital, sendo a umidade determinada por um medidor com agulhas.

Antes do carregamento, foi preparado um “forro” no piso do forno, que consistiu na disposição de peças de madeira de pequeno diâmetro, na direção horizontal. A ignição da carga de madeira foi realizada pela abertura na porta, com um maçarico. Após a ignição do forno, foi realizado o acendimento da fornalha para a queima de gases provenientes da carbonização da madeira.

O monitoramento da temperatura foi realizado a partir de oito cilindros metálicos existentes ao longo do forno. Utilizou-se um termômetro infravermelho digital, para o aferimento dos valores de temperatura. Em função da temperatura medida nas copas, procedeu-se a abertura ou fechamento dos tatus para o controle da entrada de oxigênio. O objetivo do controle da temperatura foi manter a carbonização dentro das faixas de degradação dos constituintes da madeira (variação de temperatura com o tempo), visando uma temperatura final máxima de 420°C.

O resfriamento do forno ocorreu de forma natural. O carvão, o atíço (madeira parcialmente carbonizada) e os finos (carvão de baixa granulometria), foram retirados com auxílio de um garfo metálico e depositados em sacos plásticos com capacidade de 50 litros. Todo esse material foi devidamente pesado, para verificar os rendimentos gravimétricos das carbonizações.

A massa de madeira seca, o rendimento gravimétrico (RG) do carvão, o RG de atíço e o RG de finos foram determinados por meio das Equações 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

$$M_{ms} = \frac{M_{mu}}{(1 + U)} \quad (1)$$

$$RGC = \frac{M_c}{M_{ms}} \times 100 \quad (2)$$

$$RGA = \frac{M_a}{M_{ms}} \times 100 \quad (3)$$

$$RGF = \frac{M_f}{M_{ms}} \times 100 \quad (4)$$

em que:

$M_{ms}$  = Massa de madeira seca (kg);

$M_{mu}$  = Massa de madeira úmida (kg);

$U$  = Teor de umidade da madeira;

RGC = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

$M_c$  = Massa de carvão (kg);

RGA = Rendimento gravimétrico em atíço (%);

$M_a$  = Massa de atíço (kg);

RGF = Rendimento gravimétrico em finos (%);

$M_f$  = Massa de finos (kg).

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





Para a determinação das propriedades físicas e químicas do carvão, foram retiradas três amostras de cada carbonização, em lugares específicos do forno, próximo à porta, meio e fim do forno, de maneira aleatória, sendo posteriormente feita uma amostra composta correspondente à carbonização.

A determinação da densidade relativa foi de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). O teor de materiais voláteis (TMV), de cinzas ( $TC_z$ ) e de carbono fixo (TCF), foi determinado segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1983b), e o poder calorífico superior foi encontrado segundo as especificações da norma NBR 8633 (ABNT, 1983a).

## 2.3 Análise estatística

Foi utilizada análise estatística descritiva. Os valores médios e o coeficiente de variação para as propriedades analisadas foram calculados e comparados com as informações presentes na literatura.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Propriedades dos resíduos sólidos de eucalipto

Os valores médios das propriedades físicas, químicas e energéticas dos resíduos sólidos de eucalipto amostrados antes de cada carbonização estão na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios das físicas, químicas e energéticas dos resíduos sólidos de eucalipto

Amostragem	U (%)	$d_{bas}$ (kg m <sup>-3</sup> )	PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	$TC_z$ (%)	$T_{ext}$ (%)	$T_{LIGTO}$ (%)
1	35,00	541,00	4466,50	0,38	3,97	25,99
2	43,40	534,00	4469,00	0,26	6,50	28,02
3	51,70	493,00	4602,00	0,27	4,50	25,49
<b>Média</b>	43,37	523,00	4512,50	0,31	4,99	26,50
<b>CV (%)</b>	19,25	4,92	1,72	22,19	26,72	5,06

U = Umidade.  $d_{bas}$  = Densidade básica. PCS = Poder Calorífico Superior.  $TC_z$  = Teor de cinzas.  $T_{ext}$  = Teor de extrativos.  $T_{LIGTO}$  = Teor de lignina total.

A umidade média dos resíduos madeireiros utilizados nas carbonizações foi de 43,0%. A utilização de madeiras acima do ponto de saturação das fibras (PSF 28-30%) contribui para o aumento da friabilidade do carvão e aumento do tempo de carbonização, o que implica em uma maior demanda de energia para a secagem da madeira, uma vez que o material precisa ser seco dentro do forno antes do início desse processo. Visto que a carbonização da madeira com menor teor de umidade proporciona redução no teor de finos durante o manuseio e transporte do carvão e aumento do rendimento gravimétrico final.

A densidade básica média obtida para os resíduos sólidos de eucalipto foi de 523 kg m<sup>-3</sup>, sendo considerada satisfatória para a produção de carvão vegetal. Quinhones (2011) encontrou valores de densidade básica igual a 560 e 480 kg m<sup>-3</sup> para os clones *Eucalyptus*



*camaldulensis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus urophylla*, respectivamente, visando a produção de carvão.

O valor médio da análise do poder calorífico superior (PCS) para os resíduos madeireiros foi de 4512,5 kcal kg<sup>-1</sup>, ou seja, a cada 1 quilo de madeira queimada completamente, ocorreu a geração de 4512,5 quilocalorias de energia. Oliveira et al. (2010), ao estudar as propriedades de *Eucalyptus pellita* com cinco anos de idade, obtiveram um valor médio de 4630,0 kcal kg<sup>-1</sup> para o PCS da madeira dessa espécie.

O teor de cinzas médio dos resíduos madeireiros foi igual a 0,31%, estando este valor próximo ao percentual de 0,36% encontrado por Oliveira (2012) em seu trabalho com madeira de *Eucalyptus* spp., e inferior a 1% como esperado para madeira de eucalipto.

O teor de extrativos variou de 3,97 a 6,50%, sendo encontrando um valor médio de 4,99% nos resíduos sólidos de eucalipto. Valor este que foi superior ao encontrado por Oliveira et al. (2010), que constataram um teor de extrativos de 4,53% ao avaliar as características de *Eucalyptus pellita* com cinco anos de idade. Trugilho et al. (2001) verificaram teores de 4,87 a 7,75% de extrativos em 10 espécies de eucalipto de plantio experimental, analisadas para produção de carvão vegetal.

Para o teor de lignina insolúvel e solúvel, foram encontrados valores médios de 23,25% e 3,25%, respectivamente, obtendo-se um teor de lignina total igual a 26,50% para os resíduos madeireiros. Para a produção de carvão vegetal, recomenda-se a utilização de madeiras com alto teor de lignina, visto que ela contribui para o aumento do poder calorífico superior, proporcionando maior liberação de energia durante a queima do carvão. Além disso, carbonizar madeiras com alto teor de lignina contribui para maiores rendimentos gravimétricos de carvão e de carbono fixo durante o processo de carbonização.

### 3.2 Rendimento gravimétrico da carbonização

O rendimento gravimétrico médio de carvão vegetal, atíços e finos, produzido no sistema forno-fornalha, foram 32,72%, 2,45% e 1,43, respectivamente. Na Tabela 2, estão os valores médios do rendimento gravimétrico das carbonizações.

Tabela 2. Rendimentos gravimétricos e tempo da carbonização realizada em sistema forno-fornalha

Carbonização	RGC (%)	RGA (%)	RGF (%)	RGCF (%)	t <sub>carb.</sub> (h)
1	30,84	6,65	1,84	26,45	57
2	33,52	0,71	0,88	29,45	71
3	33,80	0,00	1,56	29,98	62
<b>Média</b>	<b>32,72</b>	<b>2,45</b>	<b>1,43</b>	<b>28,63</b>	<b>63,33</b>
<b>CV (%)</b>	<b>5,00</b>	<b>148,81</b>	<b>34,49</b>	<b>6,64</b>	<b>11,20</b>

RGC = Rendimento gravimétrico em carvão. RGA = Rendimento gravimétrico em atíço. RGF = Rendimento gravimétrico em finos. RGCF = Rendimento gravimétrico em carbono fixo. t<sub>carb.</sub> = Tempo de carbonização.

O menor rendimento gravimétrico foi observado na carbonização 1, equivalente a 30,84%. Esta carbonização também obteve os maiores valores de atíços (6,65%), podendo ser



## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

justificado pela ausência da construção do forro antes do carregamento e pelo menor tempo de carbonização, e maiores teores de finos com um percentual de 1,84% que foi considerado satisfatório. Ressalta-se que esta carbonização refere-se à primeira vez que o sistema forno-fornalha foi manuseado pelo carvoeiro. Assim, os resultados encontrados são satisfatórios apesar da necessidade de ajustes no processo, os quais ocorreram antes das demais carbonizações.

A segunda e a terceira carbonização obtiveram um rendimento gravimétrico em carvão superior a 33%. Isto é justificado pelo aumento do tempo de carbonização e pela forragem do forno, o que possibilitou uma melhor circulação de ar. Na segunda carbonização, na qual realizou a forragem da metade do forno, foi verificado um rendimento gravimétrico em carvão de 33,52%, com uma menor produção de atíço (0,71%) e finos (0,88%). Já a terceira carbonização, a qual teve a parte inferior do forno completamente forrada, obteve o maior rendimento gravimétrico em carvão (33,80%), não ocorrendo geração de atíço e o teor de finos ficou na faixa de 1,56%.

A relação tempo/temperatura está diretamente ligada ao rendimento do carvão. Para uma temperatura final de carbonização constante, o menor tempo proporciona uma carbonização com maior geração de atíços. Entretanto, carbonizações com maior tempo de duração, possibilitam maior teor de carbono fixo e rendimento em carvão (OLIVEIRA et al., 2010).

O rendimento médio em carvão vegetal foi considerado satisfatório, uma vez que se trata da carbonização de resíduos madeireiros de diferentes espécies e dimensões. Além disso, o rendimento encontrado foi superior aos valores esperados em fornos de carbonização, os quais variam na faixa de 28 a 30%. Cardoso (2010) e Oliveira (2012) encontraram valores de rendimento médio igual a 29% e 33%, respectivamente, ao carbonizarem madeira de eucalipto em sistema forno-fornalha.

Os valores médios de atíços (2,45%) e finos (1,43%) foram considerados baixos, destacando-se a terceira carbonização que não houve a geração de atíço. Oliveira (2012) constatou valores superiores de atíços e finos, sendo 8,85 e 3,23% respectivamente.

Quanto ao rendimento de carbono fixo, foi obtido um valor médio de 28,63%. Este valor é superior ao encontrado por Trugilho et al. (2005), que obtiveram um percentual de RGCF de 25,93% ao carbonizarem em forno mufla seis clones de *Eucalyptus* com sete anos de idade. O alto valor de carbono fixo indica a eficiência da carbonização, o que contribui para o aumento do poder calorífico do carvão vegetal.

O tempo médio de carbonização encontrado neste estudo, compreendido entre a ignição e o fechamento das entradas de oxigênio, foi de 63 horas e 20 minutos. Valor inferior ao encontrado por Oliveira (2012), que obteve um tempo de carbonização médio em forno MF1-UFV, igual a 70 horas para madeira de *Eucalyptus* spp. a 42,50% de umidade. Já Cardoso (2010), utilizando o sistema forno-fornalha, carbonizou madeiras de *Eucalyptus* spp. com 25% de umidade em 52 horas. Portanto, nota-se que a umidade da madeira a ser carbonizada influencia diretamente no tempo de carbonização e conseqüentemente na produtividade do carvão vegetal. Outros fatores também podem influenciar o tempo de carbonização, como o diâmetro das toras e a presença de “forro” na parte inferior do forno.

### 3.3 Propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 3, encontram-se os valores médios das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal produzido nas três carbonizações.

REALIZAÇÃO



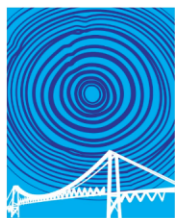
APOIO



ORGANIZAÇÃO







## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

Tabela 3. Valores médios das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal produzido em sistema forno-fornalha

Amostragem	U (%)	$d_{rap}$ (kg m <sup>-3</sup> )	PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	TC <sub>z</sub> (%)	TMV (%)	TCF (%)
1	2,77	313,00	7880,00	0,78	13,43	85,79
2	2,12	335,00	7842,00	0,46	11,69	87,85
3	1,94	302,00	8155,00	0,72	10,58	88,70
<b>Média</b>	2,30	317,00	7959,00	0,65	11,90	87,45
<b>CV (%)</b>	19,25	5,32	2,15	26,26	12,07	1,71

U = Umidade.  $d_{rap}$  = Densidade relativa aparente. PCS = Poder Calorífico Superior. TC<sub>z</sub> = Teor de cinzas. TMV = Teor de Materiais Voláteis. TCF = Teor de Carbono Fixo.

Para o carvão vegetal, a umidade encontrada variou de 1,94 a 2,77%, obtendo-se uma média de 2,30% para as carbonizações. Os valores aqui encontrados estão dentro do esperado para essa característica física do carvão vegetal, sendo determinado que a umidade desse produto deve estar abaixo de 5% (SÃO PAULO, 2003). Em seus estudos, Quinhones (2011) constatou uma variação entre 3,20 e 3,70% na umidade do carvão obtido a partir de clones de eucalipto com sete anos de idade, provenientes de plantios comerciais para fins siderúrgicos.

Gomes (2006) relata que o carvão vegetal deve ter sempre baixo teor de umidade para que seja obtido um produto com maior poder calorífico, visto que durante o processo térmico utilizar um carvão com elevado teor de água acaba comprometendo o seu rendimento.

A densidade relativa aparente média do carvão vegetal foi de 317 kg m<sup>-3</sup>. Santos (2010) encontrou valores para essa variável em clones de *Eucalyptus* com sete anos de idade, variando entre 266 e 345 kg m<sup>-3</sup>. Cardoso (2010) e Oliveira (2012), ao utilizarem esse mesmo sistema forno-fornalha para carbonização da madeira de *Eucalyptus* spp. resultante de plantios florestais, encontraram valores médios iguais a 447 e 312 kg m<sup>-3</sup>, respectivamente. É importante ressaltar que a densidade relativa aparente do carvão está diretamente ligada a densidade da madeira, ou seja, quanto maior for a quantidade de massa de madeira por volume, maior será a massa de carvão restante após o processo de carbonização.

O carvão vegetal de maior densidade apresenta maior resistência mecânica e propriedades almejadas na maioria do uso aos quais se prestam esse insumo. Com isso é possível obter ganhos em todos os processos de produção, ou seja, desde a carbonização, transporte, redução na produção de escória e no consumo de energia, além de maior estabilidade nos fornos (ISBAEX, 2014).

A temperatura de carbonização também pode influenciar a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Isso acontece porque altas temperaturas proporcionam uma carbonização mais acelerada, bem como uma maior expansão dos gases no interior do carvão, o que permite o aparecimento de rachaduras no produto e conseqüentemente a redução de sua densidade.

O poder calorífico superior do carvão vegetal obteve valores que variaram de 7880 a 8155 kcal kg<sup>-1</sup>. Oliveira (2012), ao utilizar o forno MF1-UFV, constatou uma variação de 8089 a 8131 kcal kg<sup>-1</sup> no PCS do carvão de *Eucalyptus* spp, encontrando-se próximo aos resultados obtidos neste estudo. O PCS está diretamente relacionado ao teor de extrativos e lignina da

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

madeira. Portanto, quanto maior estas duas propriedades, maior é a quantidade de energia liberada durante a queima do carvão.

O teor de cinzas ( $TC_z$ ) do carvão vegetal variou entre 0,46 e 0,78%, o teor de materiais voláteis (TMV) variou entre 10,58 e 13,43%, e o carbono fixo (CF) com variação entre 85,79 e 88,70%, para o carvão vegetal. Oliveira et al. (2010), ao carbonizarem a madeira de *Eucalyptus pellita* com cinco anos de idade em forno mufla, obtiveram  $TC_z$  entre 1,86 e 2,60%, TMV entre 9,71 e 14,65%, e CF entre 83,17 e 88,17%. O carvão vegetal obtido neste estudo obteve teor de cinzas abaixo de valores encontrados na literatura, assim como menor teor de matérias voláteis, o que contribuiu para um maior teor de carbono fixo e conseqüentemente maior poder calorífico do carvão.

Dessa forma, o carvão vegetal produzido a partir de resíduo madeireiro não tratado enquadra-se nas exigências do Selo Premium, que estabelece características como umidade abaixo de 5%, teor de carbono fixo maior que 75%, teor de materiais voláteis e de cinzas abaixo de 23,5 e 1%, respectivamente (SÃO PAULO, 2003).

#### 4. CONCLUSÕES

O carvão produzido a partir de resíduos madeireiros possui características satisfatórias, possibilitando sua comercialização para uso residencial e comercial em padarias, churrascarias, pizzarias e indústrias para o abastecimento de caldeiras.

Como a densidade relativa aparente foi inferior a faixa exigida, o carvão vegetal produzido a partir deste estudo, não foi aprovado para o abastecimento do setor siderúrgico. Assim, os índices de qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos sólidos de eucalipto em forno-fornalha estão aptos para consumo doméstico, comercial e industrial.

#### 5. AGRADECIMENTOS

A FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo) e a BBM (Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda) por possibilitarem a realização deste estudo.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. R.; REZENDE, M. E. A. O processo de carbonização contínua da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.). Produção e utilização do carvão vegetal. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC: Belo Horizonte, p.141-156, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: Madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8633: Carvão vegetal – determinação do poder calorífico: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1983a, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 8112: Carvão vegetal – análise imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1983b, 5p.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP. Normas Técnicas ABTCP. São Paulo: ABTCP, 1974, 18p.

BRASIL. Decreto-lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

CARDOSO, M. T. Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização da madeira. 2010. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

CARDOSO, M. T. et al. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. CERNE, Lavras, v. 16, Suplemento, p. 115-124, 2010.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN KV, LUDWWIG, C.H. (Eds.). Lignins: occurrence, formation, structure and reactions. New York: John Wiley, p. 241-266, 1971.

GOMES, M. T. M. Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsa de mercadorias. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. O PAPEL, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

HILLING, E. et al. Resíduos de madeira da indústria madeireira – caracterização e aproveitamento. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP, 26., 2006, Fortaleza. Anais eletrônicos... São Paulo: ABEPRO, 2006.

ISBAEX, C. Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico. 2014. 48 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014.

OLIVEIRA, A. C. Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal. 2012. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

OLIVEIRA, C. A. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. SCIENTIA FORESTALIS, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. REVISTA ÁRVORE, Viçosa-MG, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.

QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos – SQA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, Diretoria de Florestas, Laboratório de Produtos Florestais – LPF, 2002, 31p.

QUINHONES, R. Relações entre as características da madeira e carvão de *Eucalyptus* sp. Produzido a diferentes temperaturas finais de carbonização. 2011. 79 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SANTOS, R. C. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. 2010. 173 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO





## III CBCTEM

Congresso Brasileiro de Ciência  
e Tecnologia da Madeira  
Florianópolis - 2017

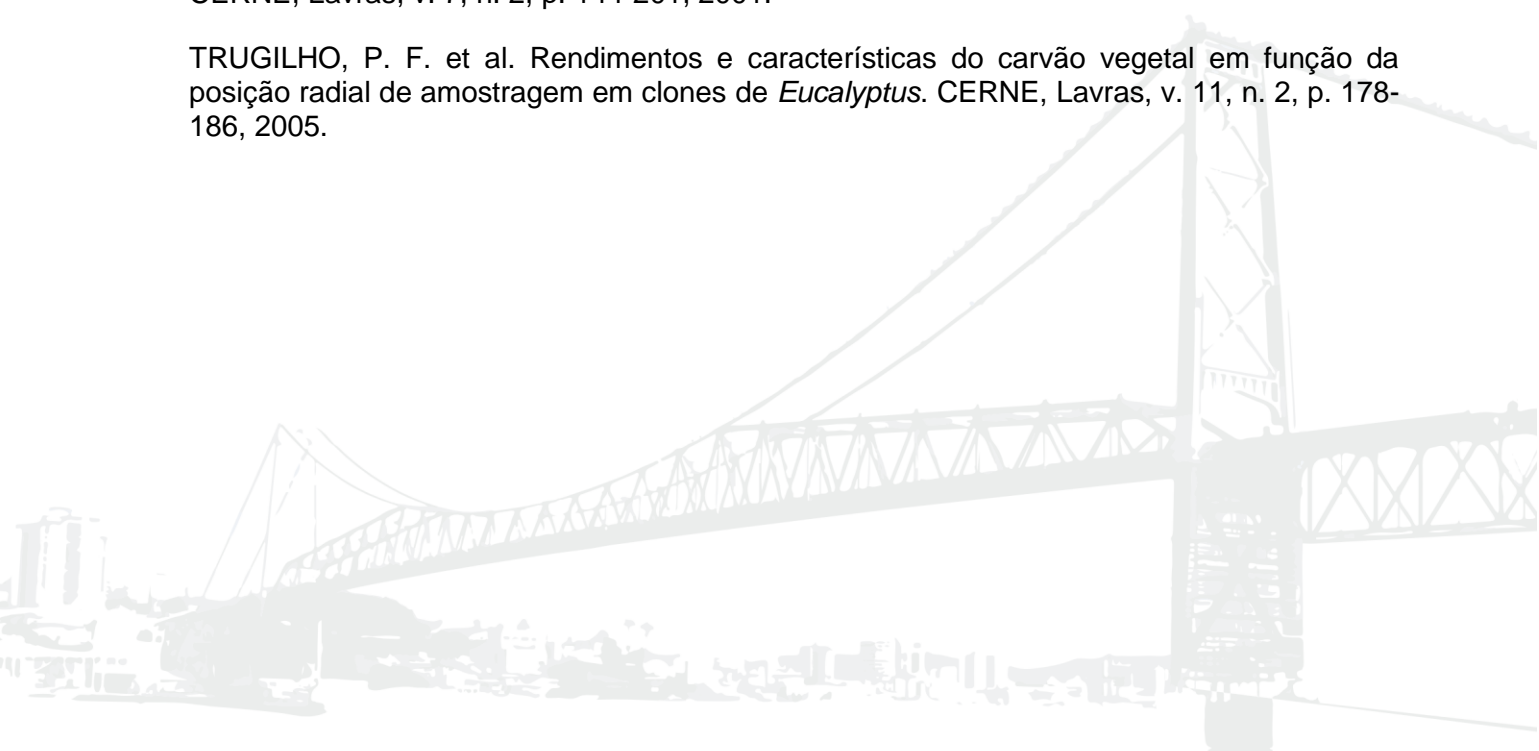
SÃO PAULO (Estado). Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003. Diário Oficial do Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, SP, v. 113, n. 129, 11 jul. 2003.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. TAPPI test methods T264 cm-97: preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: TAPPI Technology Park, 1997.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI. TAPPI test methods T257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: TAPPI Technology Park, 2002.

TRUGILHO, P. F. et al. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. CERNE, Lavras, v. 7, n. 2, p. 144-201, 2001.

TRUGILHO, P. F. et al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. CERNE, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.



REALIZAÇÃO



APOIO



ORGANIZAÇÃO

