

Qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos de eucalipto

Charcoal quality produced with eucalyptus residues

**Alaor Coelho Silva¹, Marina Donária Chaves Arantes^{2*}, Fabricio Gomes Gonçalves¹,
Maria Naruna Felix de Almeida¹, Lourdes Maria Hilgert Santos¹,
Jaily Kerller Batista de Andrade¹ e Daniela Minini¹**

RESUMO

O objetivo foi avaliar a influência do forno-fornalha no processo de carbonização de resíduos de eucalipto e qualidade do carvão vegetal, e comparar o produto obtido nesse sistema com o produzido em escala laboratorial. Foi realizada a análise das propriedades físicas e químicas dos resíduos madeireiros. Do carvão vegetal produzido em forno-fornalha e em escala laboratorial, foram realizadas as análises de rendimento gravimétrico e das propriedades físicas e químicas do carvão. O valor médio de densidade básica dos resíduos madeireiros foi de 523 kg m⁻³, poder calorífico superior 4512,5 kcal kg⁻¹, teor de cinzas 0,31%, teor de extrativos 4,99% e teor de lignina de 26,50%. Os valores de poder calorífico superior e teor de carbono fixo foram estatisticamente superiores para o carvão vegetal oriundo do sistema forno-fornalha. As médias das análises de umidade, densidade aparente do carvão, teor de materiais voláteis foram maiores para a carbonização em mufla, ou seja, em escala laboratorial. Para o teor de cinzas, as médias foram estatisticamente semelhantes entre os sistemas. O sistema forno-fornalha (modelo MF1-UFV) possui rendimento em carvão vegetal superior a outros fornos de carbonização comumente utilizados. O carvão produzido a partir de resíduos madeireiros possui características que possibilitam sua comercialização para utilização residencial e comercial.

Palavras-chave: Queima de gases; Sistemas de Carbonização; Propriedades do carvão vegetal.

ABSTRACT

The aim was to evaluate the influence of oven with kiln-furnace on the carbonization process of eucalyptus residues and the charcoal quality, and compare the product obtained in that system with that produced in laboratory scale. The physical and chemical properties of wood residues were analyzed. From the charcoal produced in oven with kiln-furnace and in laboratory scale, were made the analyzes of gravimetric yield and the physical and chemical properties. The average value of basic density of wood residues was 523 kg m⁻³, higher calorific value 4512.5 kcal kg⁻¹, ash content 0.31%, extractive content 4.99% and lignin content of 26.50%. The values of the higher calorific value and fixed carbon content were statistically superior for the charcoal from the oven kiln-furnace system. The averages of moisture analysis, apparent density of charcoal and volatile material content were higher for carbonization in a muffle, that is, on a laboratory scale. For the ash content, the means were statistically similar between the systems. The oven with kiln-furnace system (model MF1-UFV) has higher charcoal yield than other commonly used carbonization furnaces. The charcoal produced from wood residues has characteristics allowing its commercialization for residential and commercial use.

Keywords: Burning of gases; Carbonization systems; Properties of charcoal.

INTRODUÇÃO

Após o abate da árvore, a madeira é processada e, por consequência, resíduos como serragem, maravalha, aparas, refilos, costaneiras e toretes são gerados (DUTRA; NASCIMENTO; NUMAZAWA, 2005; MELO et al., 2012).

1. Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Jerônimo Monteiro / ES, Brasil.

2. Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ. Sete Lagoas / MG, Brasil.

*Autor correspondente: mdonariac@ufs.edu.br

Na maioria dos casos, esses resíduos ficam alocados no pátio das indústrias madeireiras e podem ocasionar problemas como proliferação de organismos xilófagos, risco de incêndios e desorganização do fluxo operacional (BARBOSA et al., 2011). A queima clandestina desses resíduos, que promove a liberação de gases poluentes que contribuem para redução da qualidade do ar e aumento do efeito estufa, também é realizada (BRASIL, 2009a,b). Em virtude da quantidade de resíduos gerados no setor florestal, torna-se necessário investigar uma melhor forma de aproveitamento deste material (HILLING et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2017).

Em razão das grandes pressões que os setores ambiental, social, político e econômico vêm sofrendo nos últimos anos para redução dos impactos ao meio ambiente, a busca por fontes de energia sustentáveis tem motivado diversas pesquisas no setor energético. Busca-se processos ecologicamente corretos, que tenham alta eficiência, racionalização e minimização de gastos, sendo de suma importância o aproveitamento de subprodutos (resíduos) para que essas metas sejam atingidas (LANA, 2014; SHIFERAW et al., 2018). O uso de biomassa para a produção de carvão vegetal já é uma realidade. No entanto, pouco se sabe sobre sua estrutura e composição, principalmente devido às mudanças ocorridas durante o tratamento térmico (VEIGA, et al., 2017).

No Brasil, a utilização de madeira para a geração de energia é historicamente relacionada à produção de carvão vegetal, decorrente da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico (SANTOS et al., 2011). De acordo com Cardoso et al. (2010) existem dois grandes problemas associados ao processo de carbonização. O primeiro está relacionado com a tecnologia empregada na sua produção, ou seja, o uso de fornos rudimentares, de baixo rendimento e sem controle de emissões atmosféricas. E o segundo problema é a matéria-prima utilizada, muitas vezes de origem ilegal.

A carbonização dos resíduos madeireiros utilizando um sistema forno-fornalha surge como uma alternativa, uma vez que possibilita agregar valor a um material disponível na empresa, com redução de danos ao ambiente. Isso porque, além de conferir destino ao resíduo, o uso do queimador/fornalha proporciona a redução (acima de 90%) de gases tóxicos eliminados durante a carbonização (CARDOSO et al., 2010).

Assim, a análise do carvão produzido a partir desses resíduos é fundamental para a difusão da carbonização como forma de utilização dos resíduos madeireiros por empresas de pequeno porte. Portanto, o objetivo do estudo foi avaliar a influência do forno-fornalha no processo de carbonização de resíduos de eucalipto e qualidade do carvão vegetal, e comparar o produto obtido nesse sistema com o produzido em escala laboratorial.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem e caracterização dos resíduos de madeira

Foi utilizado um forno de produção de carvão vegetal modelo MF1-UFV, instalado junto à uma empresa de tratamento químico de madeira. A matéria-prima utilizada foi proveniente de resíduos de diferentes espécies de eucalipto, como *Corymbia citriodora*, *Eucalyptus cloeziana*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis*, gerados pelo ajuste do comprimento das toras antes do processo de tratamento químico da madeira. Além disso, as toras tortuosas ou com diâmetro inferior ao comercializado pela empresa, classificadas como resíduo, também foram utilizadas.

Para a caracterização e determinação das propriedades químicas e físicas dos resíduos madeireiros, foram coletados cinco toretes de madeira antes de cada carbonização (três carbonizações), heterogêneos em espécie e diâmetro, sendo assim capazes de representar o carregamento do forno. Deste material foram retirados três discos da parte central, com três centímetros de espessura cada, para a determinação da densidade básica, conforme procedimentos descritos na Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2003).

Para a análise química dos resíduos, foram utilizadas duas cunhas opostas de cada disco, obtendo-se uma amostra composta separada conforme o lote da carbonização (carbo1, carbo2 e carbo3); para tal, utilizou-se os procedimentos descritos na norma TAPPI-T257cm-02: *Sampling And Preparing Wood For Analysis* (TAPPI, 2002). A determinação do teor de extrativos da madeira foi realizada segundo especificações da norma TAPPI-T264 cm-97: *Preparation of Wood for Chemical Analysis* (TAPPI, 1997). Posteriormente, o teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986), e a determinação da lignina solúvel foi realizada por leitura em espectrofotômetro, conforme Goldschimid (1971).

O teor de cinzas e o poder calorífico superior da madeira foram determinados segundo as normas da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP M-11/77 (ABTCP, 1974) e da NBR 8633 da ABNT (ABNT, 1983), respectivamente.

Processos de carbonização dos resíduos madeireiros

Para verificar o desempenho do sistema forno-fornalha na produção de carvão vegetal foram realizadas três carbonizações de resíduos madeireiros, logo após a instalação do conjunto.

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 para melhor aproveitamento do espaço interno. Todo o volume de madeira utilizado nas carbonizações foi pesado em uma balança digital, com precisão 0,050 kg, sendo a umidade determinada por um medidor com agulhas em uma faixa de medição de 6% a 60% (base seca). Os espaços vazios próximos à copa do forno foram preenchidos com peças menores de madeira, também na posição vertical.

Antes do carregamento, foi preparado um “forro” no piso do forno dispendo peças de madeira de pequeno diâmetro na direção horizontal. Na primeira carbonização, o forno foi preenchido com a madeira em contato direto com o piso de terra batida, sem a presença do forro. Entretanto, na segunda e terceira carbonização, ocorreu a utilização parcial e completa do forro, respectivamente. Após o carregamento do forno, a porta foi fechada com tijolo maciço cerâmico.

A ignição da carga de madeira foi realizada pela abertura na porta, com auxílio de um maçarico. A carbonização foi controlada pelo monitoramento da temperatura, controle da entrada de ar (oxigênio) pela abertura ou fechamento das lacunas (tatus) com tijolo e pela observação da queima dos gases gerados na fornalha durante a degradação térmica da madeira.

O monitoramento da temperatura foi realizado a partir de oito cilindros metálicos existentes ao longo do forno, sendo quatro na parte superior (copa) e quatro na lateral do forno (poço). Utilizou-se um termômetro infravermelho digital, com faixa de medição entre -32 e 1650°C, para o aferimento dos valores de temperatura visando uma temperatura final máxima de 420°C.

Após a ignição do forno, a fornalha para a queima de gases foi acesa. Gravetos, cascas, pequenos toretes, e um maçarico, foram utilizados para acionar a fornalha. A fornalha precisou ser abastecida em maior frequência no início da carbonização. Após a elevação da temperatura em seu interior, os gases queimados foram capazes de manter a chama acesa, reduzindo a periodicidade de abastecimentos.

Após a redução da temperatura no interior do forno (até aproximadamente 350°C) e da emissão de gases do processo de carbonização, verificada após a visualização da chaminé, as entradas de ar (tatus) e guilhotina presente no duto de comunicação forno-fornalha foram fechadas. Todos esses pontos foram selados com argamassa, composta de solo argiloso e água, para garantir a completa finalização da carbonização.

O resfriamento ocorreu de forma natural, não sendo utilizado nenhum método para acelerar este processo. O termômetro infravermelho foi utilizado para verificar a temperatura interna do forno no dia da abertura, que variou entre 27 e 30°C.

A porta do forno foi aberta após o seu completo resfriamento. O carvão foi retirado com auxílio de um garfo metálico e depositado em sacos plásticos com capacidade de 50 litros. O carvão de baixa granulometria, caracterizado como finos, assim como a madeira parcialmente carbonizada (atiço), também foram separados e ensacados. Todo esse material foi devidamente pesado, e os valores utilizados no cálculo de rendimento do processo de carbonização.

A determinação da umidade do resíduo madeireiro antes do enchimento do forno foi fundamental para encontrar o valor da massa de madeira seca. Os valores de massa de madeira, obtidos antes do enchimento do forno, foram utilizados para a determinação do rendimento gravimétrico, assim como a massa de carvão, atiço e finos identificados após a carbonização.

Posteriormente, foram realizadas três carbonizações em escala laboratorial em um forno elétrico do tipo mufla. Duas cunhas opostas foram retiradas de cada disco, as quais foram alocadas em cadinho metálico e levadas ao interior do forno. O controle de temperatura da mufla foi manual; sendo a temperatura inicial da carbonização de 150°C com aumento gradual de 50°C a cada 30 minutos até atingir a temperatura máxima de 450°C, tendo uma taxa de aquecimento de 1,67°C/min.

Os vapores produzidos a partir de cada carbonização foram conduzidos por um condensador tubular, com recolhimento do líquido pirolenhoso em um recipiente e a liberação dos gases não condensáveis para a atmosfera.

Amostragem e caracterização do carvão vegetal

Para a determinação das propriedades químicas e físicas do carvão, provenientes da carbonização em forno-fornalha, foram retiradas três amostras de cada carbonização, sendo estas recolhidas próximo à porta, meio e fim do forno, de maneira aleatória. As três amostras foram reunidas em uma amostra composta, para maior representação do carvão.

Para a caracterização do carvão produzido em laboratório, separou-se uma cunha para análises químicas e a outra foi destinada para determinação da densidade do carvão.

Após as carbonizações, determinou-se o rendimento em carvão em relação a massa de madeira seca, de ambos os processos. O rendimento gravimétrico consistiu na relação entre a massa do carvão produzido e a massa do resíduo antes do processo de carbonização, expresso em porcentagem, assim como a quantidade de líquido pirolenhoso condensado e por diferença os gases não condensáveis.

A determinação da densidade relativa aparente, para ambos os processos, foi determinada pelo método de imersão em água, descrito pela Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 11941 (ABNT, 2003).

Da mesma forma, para a determinação do poder calorífico superior utilizou-se as especificações da norma NBR 8633 (ABNT, 1983). A análise química imediata, teores de materiais voláteis (TMV), de cinzas (TCZ) e carbono fixo (TCF), foi realizada segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

Análise estatística

Foi realizada análise descritiva, na qual os resultados médios obtidos em cada carbonização foram comparados e correlacionados às informações presentes na literatura.

Para a comparação entre os sistemas de carbonização forno-fornalha e mufla, os resultados foram submetidos à teste F de homogeneidade de variâncias ($p \leq 0,05$), e as médias foram comparadas pelo teste de T ao nível de 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Propriedades dos resíduos madeireiros

As propriedades físicas e químicas dos resíduos madeireiros encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas dos resíduos madeireiros.

Table 1. Physical and chemical properties of wood residues.

Resíduos	U (%)	$d_{bas.}$ ($kg\ m^{-3}$)	PCS ($kcal\ kg^{-1}$)	TC _z (%)	T _{ext.} (%)	T _{LIGTO} (%)
Carbo 1	35,00	541,00	4466,50	0,38	3,97	25,99
Carbo 2	43,40	534,00	4469,00	0,26	6,50	28,02
Carbo 3	51,70	493,00	4602,00	0,27	4,50	25,49
Média	43,37	523,00	4512,50	0,31	4,99	26,50
CV (%)	19,25	4,90	1,70	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 dos resíduos madeireiros utilizados nas carbonizações variou de 35,0 a 51,7%, com média de 43,0%. A utilização de resíduos com umidade acima do ponto de saturação das fibras (PSF: 28-30%) contribuiu para o aumento da friabilidade do carvão, maior teor de cinzas e aumento do tempo de carbonização, uma vez que o material precisa ser seco dentro do forno antes do início deste processo. Isto implica em uma maior demanda de energia, maior queima dos resíduos e, conseqüentemente, maior geração de cinzas. Outros fatores como o diâmetro dos toretes e a presença de "forro" na parte inferior do forno, podem também ter influenciado no aumento do tempo de carbonização.

A umidade influencia negativamente a carbonização, reduzindo a quantidade de energia produzida durante o processo de combustão da madeira. Além disso, baixa umidade na madeira auxilia na produção de carvão menos friável e quebradiço e reduz o teor de finos durante o manuseio e transporte.

A densidade básica média dos resíduos de madeira de eucalipto foi de $523\ kg\ m^{-3}$, sendo considerada satisfatória para a produção de carvão, visto que é desejável madeiras com elevada densidade básica

para que a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido seja maior. Como exemplo, Quinhones (2011) encontrou valores de densidade básica igual a 560 e 480 kg m⁻³ para os clones *E. camaldulensis* x *E. urophylla* e *Eucalyptus urophylla*, respectivamente, visando a produção de carvão.

O valor médio do poder calorífico superior (PCS) encontrado para os resíduos madeireiros foi de 4.512,5 kcal kg⁻¹. Este valor ficou bem próximo ao PCS encontrado por Pereira (2012), para madeiras de *Eucalyptus* spp., de testes clonais e com sete anos e meio, equivalente a 4.554,8 kcal kg⁻¹, e por Oliveira et al. (2010), ao avaliarem as propriedades de *Eucalyptus pellita* com cinco anos de idade, obtiveram um valor médio de 4630,0 kcal kg⁻¹ para a madeira dessa espécie.

O teor de cinzas médio dos resíduos foi igual a 0,31%, próximo ao 0,36% encontrado por Oliveira (2012) para 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%, com média de 4,99%. Oliveira et al. (2010), avaliando as características do *Eucalyptus pellita* de cinco anos, constataram teor de extrativos igual a 4,53%, enquanto Trugilho et al. (2001), encontraram uma porcentagem de 4,87 a 7,75% de extrativos para 10 espécies de eucalipto de plantio experimental, analisadas para produção de carvão vegetal.

Para o teor de lignina insolúvel e solúvel, foram encontrados os valores médios de 23,25 e 3,25%, respectivamente, obtendo-se um teor de lignina total igual 26,50% para os resíduos madeireiros. Entretanto, Santos et al. (2011) encontraram para clones de *Eucalyptus*, com sete anos de idade e provenientes de plantios comerciais, um teor de lignina total igual a 32,00%, enquanto Frederico (2009) obteve uma variação entre 28,90 e 31,10% para clones de *Eucalyptus* de três anos, plantados em diferentes regiões de Minas Gerais.

Elevado teor de extrativos e de lignina resulta em um carvão com maior densidade e resistência (SANTOS, 2010). É interessante a utilização de madeiras com alto teor de lignina para a produção de carvão vegetal, visto que ela contribui para o aumento do poder calorífico superior, proporcionando maior liberação de energia durante a queima do carvão. Portanto, o valor de lignina total encontrado para a madeira neste estudo, encontra-se abaixo dos valores encontrados na literatura para produção de carvão vegetal.

Rendimento gravimétrico das carbonizações

Após a realização das carbonizações nos sistemas forno-fornalha e mufla, foram determinados o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, atíço, finos, e tempo de carbonização (Tabela 2).

Tabela 2. Rendimentos gravimétricos do processo de carbonização em sistema forno-fornalha e mufla.

Table 2. Gravimetric yields of the carbonization process in furnace-furnace and muffle systems.

Forno-fornalha					
	RGC (%)	RGA (%)	RGF (%)	RGCF (%)	t _{carb.} (h)
Carbo 1	30,84	6,65	1,84	26,45	57,0
Carbo 2	33,52	0,71	0,88	29,45	71,0
Carbo 3	33,80	0,00	1,56	29,98	62,0
Média	32,72	2,45	1,43	28,63	63,3
CV (%)	5,00	148,81	34,49	6,64	11,2
Mufla					
Carbo 1	34,44	0,00	0,00	25,79	3,5
Carbo 2	37,08	0,00	0,00	26,97	3,5
Carbo 3	33,04	0,00	0,00	24,55	3,5
Média	34,85	0,00	0,00	25,77	3,5
CV (%)	5,89	0,00	0,00	4,71	0,00

RGC = Rendimento em carvão; RGA = Rendimento em atíço; RGF = Rendimento em finos; RGCF = Rendimento gravimétrico em carbono fixo. t_{carb.} = Tempo de carbonização.

O rendimento gravimétrico médio do carvão vegetal em forno-fornalha foi de 32,72%, entretanto, o menor rendimento foi observado na primeira carbonização, equivalente a 30,84%. Esta carbonização obteve os maiores valores de atíço (6,65%), podendo ser justificado pela ausência da construção do forro antes do carregamento do forno e pelo menor tempo de carbonização. O maior teor de finos também foi encontrado na carbonização 1, equivalente a 1,84%, porém considerado satisfatório. Ressalta-se que esta primeira carbonização se refere à primeira vez que o sistema forno-fornalha foi

utilizado 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 em forno-fornalha 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 a parte inferior do forno foi 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%.

Para as carbonizações em mufla, o rendimento médio em carvão vegetal foi de 34,85%. Vale ressaltar que as duas metodologias de carbonização não diferiram estatisticamente quanto às porcentagens de rendimento gravimétrico em carvão vegetal. De uma maneira geral, ao relacionar o rendimento de carvão produzido com eucalipto, as porcentagens obtidas nos dois sistemas de carbonização se assemelham a outros trabalhos da literatura, como o realizado por Protásio et al. (2014), que encontraram um valor médio de 31,7% de RGC.

O rendimento médio em carvão vegetal desse estudo 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 a valores esperados em fornos de carvão vegetal, 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 atíço (2,45%) e finos (1,43%) das carbonizações em forno-fornalha foram considerados baixos, destacando-se a terceira carbonização, com geração de 0% de atíço. Oliveira (2012) constatou valores superiores de atíço e finos, iguais a 8,85 e 3,23%, respectivamente. Para as carbonizações em mufla, não foram obtidos rendimentos em atíço e finos, pelo fato deste processo ser realizado em ambiente controlado.

Um rendimento em carbono fixo médio igual a 28,63% foi encontrado para o carvão vegetal obtido em sistema forno-fornalha. Já o valor médio das carbonizações em mufla foi de 25,77%, percentual este próximo ao encontrado por Trugilho et al. (2005), os quais verificaram um rendimento de 25,93% ao carbonizarem a madeira de seis clones de *Eucalyptus* de sete anos em forno mufla. 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 de carbonização médio das carbonizações no sistema forno-fornalha, compreendido entre a ignição e o fechamento das entradas 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. Entretanto, 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 consequentemente na produtividade do carvão vegetal.

Propriedades do carvão vegetal

Na Tabela 3, estão representados os valores médios das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal produzido em sistema forno-fornalha e na carbonização em mufla.

Tabela 3. Qualidade do carvão vegetal produzido em sistema forno-fornalha e em mufla.

Table 3. Quality of charcoal produced in kiln-furnace and muffle systems.

Sistema	U (%)	d_{rap} (kg m ⁻³)	PCS (kcal kg ⁻¹)	TCz (%)	TMV (%)	TCF (%)
Forno-fornalha	2,30*	317,00*	7959,00*	0,65 ^{ns}	11,90*	87,45*
Mufla	5,40*	433,90*	7340,17*	0,53 ^{ns}	25,50*	73,97*

^{ns} não significativo; * significativo a 5% pelo teste T. U = Umidade; d_{rap} = Densidade Relativa Aparente; PCS = Poder Calorífico Superior; TCz = Teor de cinzas; TMV = Teor de Materiais Voláteis; TCF = Teor de Carbono Fixo.

Para o carvão vegetal obtido em sistema forno-fornalha, a umidade encontrada variou de 1,94 a 2,77%, obtendo-se uma média de 2,30% para as carbonizações realizadas nesse sistema, enquanto que na carbonização em mufla a média foi de 5,40%, variando de 5,07 a 5,56%. Somente os valores encontrados na carbonização em forno-fornalha 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).

A densidade relativa aparente média encontrada para o carvão vegetal oriundo do forno-fornalha foi de 317 kg m^{-3} , enquanto que o carvão produzido em mufla apresentou maior densidade, de $433,9 \text{ kg m}^{-3}$.

Os valores obtidos para o poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal variaram entre 7.880 e $8.155 \text{ kcal kg}^{-1}$ em forno-fornalha, possuindo uma média de $7.959 \text{ kcal kg}^{-1}$. Nesse sistema, os valores do PCS foram maiores quando comparado com os resultados obtidos na mufla, com valor médio de $7.340,17 \text{ kcal kg}^{-1}$. O estudo realizado por Oliveira (2012), utilizando o forno MF1-UFV, constatou uma variação de 8.089 a $8.131 \text{ kcal kg}^{-1}$, 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 madeira. Portanto, quanto maior estas duas propriedades, maior é a quantidade de energia liberada durante a queima do carvão.

Para ambos os sistemas de carbonização, o carvão vegetal obteve teor de cinzas abaixo dos valores encontrados na literatura, com as médias estatisticamente semelhantes. Os valores médios de TMV e TCF foram diferentes entre os dois sistemas, sendo que na mufla foi produzido carvão com maior TMV e menor TCF, e no forno-fornalha ocorreu o inverso.

Oliveira et al. (2010), ao carbonizar a madeira de *Eucalyptus pellita* aos cinco anos de idade em forno mufla, encontraram TMV, TCz e CF entre 9,71 e 14,65%; 1,86 e 2,60%; e 83,17 e 88,17%, respectivamente. Na carbonização de Oliveira (2012) em forno-queimador, os valores médios de 17,07%, 1,00% e 81,93% foram obtidos para o TMV, TCz e CF, respectivamente.

As diferenças observadas nos valores das propriedades do carvão vegetal produzido nos dois sistemas avaliados podem ser relacionadas a heterogeneidade das amostras de madeira carbonizadas. Os resíduos utilizados, além de provenientes de diferentes espécies de eucalipto, apresentaram variada densidade, diâmetro e comprimento das toras, o que dificulta uma amostragem homogênea e representativa do produto.

Entretanto, somente o carvão produzido no sistema forno-fornalha se enquadrou nas exigências do Selo Premium, promulgado pela Resolução n° 10 SAA, de 11 de julho de 2003, no estado de São Paulo, o qual estabelece requisitos mínimos do carvão vegetal para os mais variados usos. Entre as características necessárias estão: umidade abaixo de 5%; teor de carbono fixo maior que 75%; e teor de materiais voláteis e de cinzas abaixo de 23,5 e 1%, respectivamente (SÃO PAULO, 2003). Estando, assim, o carvão produzido apto para uso doméstico e comercial (churrascarias, padarias, restaurantes), bem como em indústrias que necessitam de biomassa para o aquecimento de caldeiras.

CONCLUSÕES

O sistema forno-fornalha (modelo MF1-UFV) possui rendimento em carvão vegetal superior a outros fornos de carbonização comumente utilizados. O carvão produzido a partir de resíduos madeireiros no forno possui características que possibilitam sua comercialização para uso residencial e comercial em padarias, churrascarias, pizzarias e indústrias para o abastecimento de caldeiras.

Comparando os dois métodos de carbonização, forno e laboratório, somente o carvão produzido no sistema forno-fornalha se enquadrou nas exigências do Selo Premium. Porém, as diferenças observadas podem estar relacionadas a heterogeneidade das amostras de madeira carbonizadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo) pelo auxílio financeiro para realização do projeto de pesquisa; à professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro da Universidade Federal de Viçosa pelo repasse do projeto, viabilizando a pesquisa; à BBM (Bragança Beneficiamento de Madeiras Ltda) por possibilitarem a realização deste estudo; e ao Laboratório de Energia da Biomassa do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo por disponibilizarem a infraestrutura e equipamentos durante as análises.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1983.
- ABTCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Normas Técnicas ABTCP. São Paulo: ABTCP, 1974.
- BARBOSA, J. C.; CAMPOS, C. I.; VASCONCELOS, J. S.; ARAUJO, V. A.; WAKABAYASHI, M. K.; REGLI, J. P. **Aproveitamento de Resíduos da Indústria Madeireira para Utilização em Pequenos Empreendimentos Econômicos Solidários**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION. 3., 2011, São Paulo. Anais... São Paulo: IWACP, 2011. 1-10 p.
- BRASIL. MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos**. 2009a. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf >. Acesso em: 10 fev. 2018.
- BRASIL. MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. 2009b. Disponível em: < http://www.mma.gov.br/estruturas/164_publicacao/164_publicacao10012011032535.pdf >. Acesso em 10 fev. 2018
- CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNERO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. V.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. *Cerne*, Lavras, v. 16, p. 115-124, 2010.
- DUTRA, R. I. J. P.; NASCIMENTO, S. M.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Belém, n. 5, p. 1-19, 2005.
- FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWWIG, C. H. **Lignins**: occurrence, formation, structure and reactions. New York: John Wiley, 1971. p. 241-266.
- GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.
- HILLING, É.; SCHNEIDER, V. E.; WEBER, C.; TECHCHIO, R. D. Resíduos de madeira da indústria madeireira – caracterização e aproveitamento. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 26., 2006, Fortaleza. Anais... São Paulo: ABEPRO, 2006.
- LANA, A. Q. **Desenvolvimento e avaliação de uma fornalha metálica para combustão dos gases da carbonização da madeira**. 2014. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- MELO, L. E L.; SILVA, C. J.; LOPES, K. V.; BRITO, P. G. M.; SANTOS, I. S. Resíduos de Serraria no Estado do Pará: Caracterização, Quantificação e Utilização Adequada. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 19, n. 01, p. 113-116, 2012.
- 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, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE JÚNIOR, C. R. Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. *Revista de Ciências Agrárias*, Lisboa, v. 40, n. 3, p. 683-691, set. 2017.

OLIVEIRA, C. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. 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.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PROTÁSIO, T. H.; GIULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

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.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SÃO PAULO (Estado). Resolução n° 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.

SHIFERAW, Y.; TEDLA, A.; MELLESE, C.; MENGITSU, A.; DEBAY, B.; SELAMAWI, Y.; MERENE, E.; AWOL, N. Conversion of coffee residue waste and *Eucalyptus globulus* leaf extract into an alternative solid fuel. **Energy sources**, v. 40, n. 7, p. 780-786, 2018.

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

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

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 144-201, 2001.

VEIGA, T. R. L. A.; LIMA, J. T.; DESSIMOI, A. L. A.; PEGO, M. F. F.; SOARES, J. R.; TRUGILHO, P. F. Different plant biomass characterizations for biochar production. **Revista Cerne**, Lavras, v. 23, n. 4, p. 529-536, 2017.

Recebido em: 21/03/2018

Aceito em: 10/12/2018