

PRODUTO 7: Relatório de validação da operação do sistema fornos-fornalha na unidade demonstrativa sem aproveitamento de coprodutos, em conformidade com as condições da mesorregião onde foi instalado

Relatório referente a Ação 7 vinculada ao Edital JOF-1069/2019; Incentivo à produção sustentável de carvão vegetal de florestas plantadas, com melhoria das tecnologias de produção e execução de programas de capacitação.

Equipe Técnica:

Marina Donária Chaves Arantes/UFSJ
Ana Flávia Neves Mendes Castro/UFSJ
Glauciana da Mata Ataíde/UFSJ
Renato da Silva Vieira/UFSJ
Renato Vinícius Oliveira Castro/UFSJ
Silvana Maria Novais Ferreira Ribeiro/INAES
Isabella Carolina de Almeida/UFSJ/Estagiária
Lívia Ferreira da Silva/UFSJ/Estagiária
Reginaldo Arthur Gloria Marcelino/UFSJ/Estagiário

**Sete Lagoas, MG
2019**

Sumário

1. Apresentação do relatório referente ao produto 7.	3
2. Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere ao rendimento gravimétrico, queima da fumaça e outros aspectos relacionados à produção sustentável de carvão vegetal.	4
2.1 Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere ao rendimento gravimétrico.	4
2.2 Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere a queima da fumaça.	7
2.3 Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere a outros aspectos relacionados à produção sustentável de carvão vegetal.	11
2.3.1 Introdução.	11
2.3.2 Materiais e métodos	13
2.3.3 Propriedades físicas da madeira e carvão vegetal	14
2.3.4 Propriedades químicas da madeira e análise química imediata do carvão vegetal.	16
2.3.5 Resultados e Discussões	17
2.3.6 Conclusões	24
2.3.7 Referências Bibliográficas.	25

1. Apresentação do relatório referente ao produto 7.

De acordo com a proposta técnica submetida ao edital JOF-1069/2019; Incentivo à produção sustentável de carvão vegetal de florestas plantadas, com melhoria das tecnologias de produção e execução de programas de capacitação, para que este projeto seja realizado de forma adequada e atenda a todas as suas especificidades, a metodologia para o desenvolvimento das atividades foram subdivididas em dez etapas, adaptado à mesorregião de execução da presente proposta, as quais possuem suas ações descritas na metodologia da proposta e deverão ser envidas por meio de relatórios de acordo com o novo cronograma de execução, a saber:

Novo cronograma de execução do edital JOF-1069/2019; Incentivo à produção sustentável de carvão vegetal de florestas plantadas, com melhoria das tecnologias de produção e execução de programas de capacitação.

Produto	Prazo de Entrega (após a assinatura do Contrato)	Montante a ser pago (em % do total do Contrato)
Produto 1	7 dias	2,5%
Produto 2	21 dias	10%
Produto 3	31 dias	5%
Produto 4	52 dias	25%
Produto 5	52 dias	25%
Produto 6	127 dias	7,5%
Produto 7	127 dias	7,5%
Produto 8	187 dias	5%
Produto 9	197 dias	2,5%
Produto 10	207 dias	10%
TOTAL	210 dias	100%

Desta forma foi previsto na metodologia da proposta como Produto 7, a ação referente à Ação 7: Relatório de validação da operação do sistema fornos-fornalha na unidade demonstrativa sem aproveitamento de coprodutos, em conformidade com as condições da mesorregião onde foi instalado.

2. Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere ao rendimento gravimétrico, queima da fumaça e outros aspectos relacionados à produção sustentável de carvão vegetal.

2.1 Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere ao rendimento gravimétrico.

As atividades para o processo de carbonização ocorreram seguindo as orientações contidas na cartilha de operação do Sistema fornos-fornalha (Produção sustentável de carvão vegetal: manual de operação de sistema fornos-fornalha / Ministério do Meio Ambiente ... [et al.]. – Brasília, DF: MMA, 2019), e na dissertação de Oliveira, Aylson Costa. Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal. Viçosa, MG, 2012, conforme indicado no Produto 6 e com as seguintes atividades:

Carregamento do forno: Antes do carregamento do forno, procedeu-se à limpeza dos controladores de ar, dos ductos de condução dos gases, da fornalha e da chaminé. O carregamento do forno foi realizado manualmente, tendo a madeira sido posicionada verticalmente, até a altura de 1,1 m. Na parte superior do forno, a madeira foi colocada na posição horizontal, para redução de espaços vazios e melhor aproveitamento do espaço interno do forno. Após o carregamento do forno a porta foi fechada com tijolo maciço cerâmico e argamassa de solo argiloso, areia e água. Uma abertura de 30 cm de comprimento e 5 cm de espessura foi deixada na parte superior da porta, para ignição do forno.

Ignição e controle da carbonização: Durante a ignição do forno todos os controladores de ar e a guilhotina permaneceram abertos. O controle da carbonização foi realizado pelo monitoramento da temperatura, pelo controle da entrada de ar (oxigênio) para dentro do forno por meio da sua abertura ou do fechamento com tijolo e pela saída dos gases originários da degradação térmica da madeira pelo ducto de condução dos mesmos do forno para a fornalha. A temperatura do forno foi monitorada a partir dos quatro cilindros metálicos instalados, utilizando um pirômetro. De acordo com as temperaturas obtidas, principalmente na parte superior do forno, procedeu-se o fechamento ou a abertura das entradas de ar, e conseqüentemente, o controle da carbonização em função das faixas de degradação térmica da madeira, tendo como meta a temperatura máxima final de carbonização média de 470 °C.

Combustão dos gases da carbonização na fornalha: Após a ignição do forno realizou-se o acendimento da fornalha, que estava abastecida com resíduos lignocelulósicos. Abastecimentos posteriores foram necessários para manter a chama acesa e elevar a temperatura na fornalha. Quando os gases gerados durante a carbonização da madeira no forno atingiram $\pm 120^{\circ}\text{C}$, o abastecimento da fornalha com resíduos foi suspenso, pois os gases gerados foram capazes de manter a combustão. Deste momento até próximo ao fim da carbonização, quando ocorreu a diminuição no volume de gases liberados, a chama dentro da câmara de combustão da fornalha permaneceu acesa. Para controle da combustão de gases na fornalha, a abertura de

alimentação e entrada de ar permaneceu parcialmente fechada com tijolo maciço cerâmico, para reduzir a entrada de oxigênio, mantendo a queima mais lenta, e obter uma combustão completa. Os tijolos foram retirados somente no momento do abastecimento da fornalha com resíduos.

Resfriamento dos fornos: Ao final do processo de carbonização, quando o volume de gases e a temperatura interna do forno diminuía, procedeu-se seu fechamento total, para início da etapa de resfriamento. A vedação total do forno foi realizada, fechando-se os controladores de ar e descendo a guilhotina até ao nível do solo, evitando a entrada de oxigênio para o interior do forno. O resfriamento do forno foi natural, não utilizando nenhum procedimento para redução do tempo dessa etapa. Durante o resfriamento, as temperaturas internas do forno foram obtidas a partir dos oito cilindros de medição, por meio do uso de medidor infravermelho de temperatura.

Abertura, descarregamento do forno e rendimento gravimétrico da carbonização: Até o final de fevereiro/2020, as etapas de abertura, descarregamento do forno e rendimento gravimétrico da carbonização, ainda não tinham sido executadas devido às fortes chuvas na mesorregião onde foi instalado o sistema fornos-fornalha, atrasando assim estas atividades. No período de 02/03/2020 a 27/03/2020, os fornos foram descarregados, pois teve-se condições climáticas para tal. As informações a seguir referem-se à abertura e descarregamento dos fornos e cálculo do rendimento gravimétrico.

Após todo o processo de carbonização, realizou-se a descarga dos fornos (Figura 26) e obteve-se o rendimento gravimétrico da carbonização, por meio da relação da massa seca do carvão e massa seca de madeira, dado em percentual.



Figura 26. Descarga dos fornos após o processo de carbonização.

O rendimento gravimétrico é influenciado por vários fatores, entre eles, os parâmetros do processo e condução da carbonização e a qualidade da madeira enfiada. Os fornos no qual ocorreu a carbonização da madeira para esta pesquisa possuem diferentes revestimentos, além disto, o período em que ocorreu o processo foi de chuvas intensas, o que provocou uma variação do tempo de carbonização de cada forno (Tabela 4).

Foi encontrada uma variação de rendimento entre 18% e 34%, com a média entre os valores de rendimento gravimétrico entre os três fornos de 26%. Exceção do forno 4, que não foi possível finalizar as coletas de dados, devido a paralização das atividades devido ao coronavirus. O primeiro forno obteve rendimento gravimétrico de 34%, a madeira enfiada possuía a menor umidade (31,2%), maior densidade (0,677 g/cm³) e o processo de carbonização foi conduzido pela equipe técnica da UFV, com o acompanhamento da equipe técnica da UFSJ e participantes do curso teórico/prático em produção sustentável de carvão vegetal. O segundo forno, a umidade da madeira (63,4%) foi superior ao do primeiro, a densidade (0,491 g/cm³) inferior, sendo o processo de carbonização iniciado pela equipe técnica da UFV e findado pela equipe técnica da UFSJ. O terceiro forno com umidade da madeira de maior valor (65.1%), pois a madeira ficou exposta por um tempo superior no pátio, densidade também de 0,491 g/cm³ e com maior tempo de carbonização, pois o termometro laser digital infravermelho estragou durante o final de semana, ficando a condução do processo de carbonização de forma empírica, assim contribuindo para a queda do rendimento gravimétrico da carbonização, desta forma fica evidente a necessidade do acompanhamento da temperatura por meio de um termometro laser digital infravermelho durante o processo de carbonização, como também o treinamento dos operadores para a boa condução do processo de carbonização.

Tabela 4: Valores médios de tempo de carbonização, Dados de pesagem e cálculo de rendimento gravimétrico do carvão.

Forno	T.C (horas)	D.M (cm)	U.M (%)	U.C (%)	RG (%)	DB (g/cm ³)
1	98 hs	16.5	31.2	5.7	34.00	0,677
2	98 hs	9.59	63.4	6.2	25.00	0.491
3	123 hs	9.91	65.1	20.1	18.00	0.491
4	-	8.64	-	-	-	-

D.M: Diâmetro médio da madeira, U.M: Umidade média da madeira; U.C: Umidade média do carvão; RG: Rendimento gravimétrico da carbonização.

Ressalta-se que estas foram as primeiras carbonizações destes fornos e que a equipe que está operando os fornos também está em processo de aprendizagem/treinamento, assim, espera-se que com novos processos de carbonizações e com condições climáticas adequadas ao processo de carbonização, que este obtenha melhores resultados. Essa melhora nos resultados é esperada pois é muito comum em sistemas de carbonização convencionais que fornos recém construídos e na primeira marcha de carbonização, obterem

resultados mais baixos daqueles encontrados em fornos já em trabalho á mais tempo. Essa constatação se deve a diversos fatores como, umidade do próprio forno, pequenos vazamentos que são debelados por meio da impregnação do alcatrão e defeitos na execução da barrela que só são detectados com saída da fumaça.

Observações aprendidas durante o treinamento e que devem ser observadas em todos os ciclos de carbonização:

- a) O processo de carbonização ocorre da porta para o fundo do forno, pois caso contrário ocorre a requeima do carvão.
- b) O ideal é abrir os tatus de forma homogênea, ou seja, dos dois lados, mas sempre observando o andamento do processo de carbonização, pois um lado pode carbonizar antes que o outro (entrada diferente de ar, devido ao posicionamento do forno no campo, direção do vento), então é muito importante o controle da entrada de ar.
- c) Jamais fechar a válvula borboleta por completo e abrir os tatus, pois pode aumentar a pressão dentro do forno e causar danos estruturais e até mesmo explosões.
- d) A utilização do termômetro laser digital infravermelho é importante não somente para o acompanhamento do processo de carbonização mas também durante o período que o carvão fica estocado no pátio, para verificar a temperatura do carvão.
- e) Todos os dias pela manhã verificar a temperatura dos fornos, se estes permanecem dentro da curva de carbonização (cartilha), utilizar a sonda metálica (vergalhão) para verificar se o forno está todo carbonizado. Fechar o tatu quando a sonda for introduzida pelo menos um metro no forno, conferiri se os dutos estão bem vedados, para que não tenha entrada de ar e isto impacte no produção de carbonização; nunca abrir a fornalha com o operador na frente dela, para evitar acidentes.

2.2 Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere a queima da fumaça.

Para a operação da fornalha e conseqüentemente a queima dos gases gerados durante o processo de carbonização seguiu-se as orientações contidas na cartilha de operação do Sistema fornos-fornalha (Produção sustentável de carvão vegetal: manual de operação de sistema fornos-fornalha / Ministério do Meio Ambiente ... [et al.]. – Brasília, DF: MMA, 2019).

Como nas fases 1 e 2, iniciais da carbonização da madeira, existe grande liberação de vapor d'água junto aos gases, o que diminui seu poder calorífico, dificultando a queima da fumaça, sendo necessário o abastecimento periódico com resíduos lignocelulósicos (Figura 1 e 2) para manter a combustão no interior da câmara e conseqüentemente a queima da fumaça.

Já nas fases finais, 3 e 4, os próprios gases da carbonização da madeira foram em alguns momentos capazes de manter a combustão na câmara, perpetuando a chama acesa sem necessitar de abastecimentos com resíduos ou madeira, quando necessário os resíduos lignocelulósicos foram introduzidos na câmara de combustão.

Durante a combustão dos gases as temperaturas da câmara de combustão da fornalha variaram de 600 °C a 800 °C; sendo estas capazes de destruir termicamente por meio do calor os gases poluentes gerados pelo processo de carbonização quase que completamente, como metano, monóxido de carbono e gases condensáveis. Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 é possível visualizar que durante o processo de carbonização não ocorre a emissão de poluentes.



Figura 1. Fornalha queimando resíduos lignocelulósicos a fim do calor e chamas produzidos extinguirem termicamente os gases poluentes do processo de carbonização.



Figura 2. Fornalha queimando resíduos lignocelulósicos a fim do calor e chamas produzidos extinguirem termicamente os gases poluentes do processo de carbonização.



Figura 3. Sistema fornos-fornalha operando sem a emissão de poluentes.



Figura 4. Sistema fornos-fornalha operando sem a emissão de poluentes.



Figura 5. Sistema fornos-fornalha operando sem a emissão de poluentes.

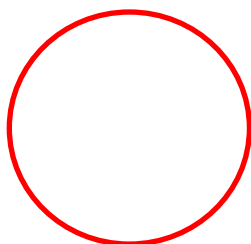




Figura 6. Sistema fornos-fornalha operando sem a emissão de poluentes.

2.3 Registro da metodologia, atividades e resultados de pesquisa realizados sobre a operação do sistema fornos-fornalha no que se refere a outros aspectos relacionados à produção sustentável de carvão vegetal.

Foi considerado como outros aspectos relacionados à produção sustentável de carvão vegetal, a caracterização da madeira enfiada e do carvão vegetal produzido.

2.3.1 Introdução

A madeira é uma das principais fontes de energia renováveis existentes dentro da matriz energética mundial, além de atuar por meio da fotossíntese das árvores como fixadora de carbono atmosférico contribuindo para redução do efeito estufa. Por ser um material extremamente diverso e existem diversas espécies adaptadas a diferentes ambientes, a madeira é um material que possui valores tanto ambientais quanto econômicos e sociais, sendo considerada o combustível mais antigo utilizado pelo homem (Gonçalves et al. 2017).

De acordo ainda com estes autores, em termos de Brasil, a madeira e o carvão vegetal estão entre as principais fontes de energia utilizadas dentro desta matriz energética quando se trata de recursos renováveis, juntamente com a energia proveniente de hidrelétricas e bagaço de cana, juntas essas fontes de energia correspondem a 42,4 % da energia gerada no país e a madeira e carvão vegetal correspondem a 9,1% deste valor.

Cabe ressaltar que a madeira utilizada para estes processos de obtenção de energia deve ser proveniente de plantios de reflorestamento, ou seja, florestas plantadas inteiramente para estes fins e não de florestas nativas. Contudo, o estado de Minas Gerais no ano de 2008 possuía cerca de 1,8 milhões de hectares de florestas plantadas com clones de *Eucalyptus* spp. correspondendo a 90% da área total de reflorestamento no país para fins energéticos, sendo o principal objetivo destas florestas a produção de energia para o setor siderúrgico que é forte neste estado (Associação Mineira de Silvicultura, 2010).

A utilização da biomassa de origem florestal se constitui como uma fonte renovável de energia, sendo extremamente importante para suprir as demandas das siderurgias, no qual, o Brasil é líder mundial na produção de aço a partir do carvão vegetal, este, com uma produção que ultrapassa a marca de 4,5 toneladas ano, e o estado de Minas Gerais, se destaca por ser o principal produtor e consumidor dessa base energética no país, devido ao seu parque siderúrgico (Simioni et al., 2017; Pessoa, & de Pádua Ribeiro, 2017; Fontes et al., 2005; Rezende et al., 2005; IBA, 2019).

O carvão vegetal é o resultado da carbonização de madeira, ele é utilizado para vários fins como termorredutor do minério de ferro em siderurgia, combustível de aquecedores, lareira, churrasqueiras (IBÁ, 2019). E ainda no setor das siderúrgicas, o Brasil se destaca como um produtor em escala mundial deste combustível que é utilizado em grande escala para produção de ferro gusa e de ligas metálicas alimentando os altos-fornos brasileiros, corroborando para o desenvolvimento dos “selos verdes”, “sustentabilidade” e “produção sustentável”, aliado a isto, as unidades produtoras devem estar dentro dos aspectos e critérios normativos exigidos pela Deliberação Normativa COPAM de nº 227, de 29 de agosto de 2018, que estabelecem uma série de exigências a serem cumpridas como fonte primária da sustentabilidade e atualização do “selo verde” de produção. (FIGUEIRÓ, 2018).

A qualidade do carvão vegetal depende de vários fatores que vão desde a escolha do material genético na silvicultura base, até o processo de carbonização e retirada do carvão vegetal, entrelaçada em toda cadeia produtiva, daí a importância dos estudos de caracterização das cadeias produtivas, os quais, são essenciais para a compreensão do contexto histórico produtivo e de suas interações dentro da propriedade da unidade produtora (ASSIS et al., 2012).

Com isto, este projeto desenvolvido na Universidade Federal de São João del-Rei UFSJ, tem como principal objetivo, de unir esforços para reduzir a emissão de gases estufa no Brasil, assim, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento/PNUD Brasil implementou o Projeto Siderurgia Sustentável, sob a

coordenação técnica do Ministério do Meio Ambiente/MMA e com recursos do Fundo para o Meio Ambiente Global/GEF, incentivar processos para o desenvolvimento de tecnologias e arranjos produtivos inovadores e mais eficientes para a produção de carvão vegetal advindo de florestas plantadas, para seu uso na siderurgia brasileira, por meio do Sistema de produção fornos-fornalha, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, visando atender e respeitar as atualizações nas legislações ambientais que regem as emissões de particulados diretamente na atmosfera nas Unidades Produtoras.

Durante a compra do carvão vegetal, o setor siderúrgico deve levar em consideração alguns fatores de qualidades que o mesmo deve apresentar como: baixo teor de umidade, baixo teor de cinzas e material volátil, além de alta densidade energética, alto teor de carbono fixo e alto poder calorífico e com alto rendimento

gravimétrico como forma primordial de avaliação do processo de carbonização (ROSA et al., 2012).

Um carvão com todas estas qualidades contribui para o aumento da permeabilidade do alto-forno, pois, pode ocupar até 80% do volume da carga (FIGUEIRÓ, 2018). Além disso, o carvão vegetal contribui para a diminuição das emissões de CO₂ na atmosfera por parte das siderúrgicas brasileiras, portanto sabe-se que o Brasil já se consolidou neste setor de produção de biomassa, pois o mesmo é praticamente isento de enxofre e fósforo aumentando a qualidade do ferro gusa e contribuindo para um maior valor agregado do produto (ASSIS et al., 2012).

Analisado o exposto acima, este trabalho teve como objetivos, determinar o teor de umidade, matérias voláteis, rendimento gravimétrico e teor de cinzas dentro dos limites de tolerância, presentes na análise química imediata do carvão vegetal, assim como as análises das propriedades químicas e físicas da madeira como fonte de matéria prima, para o abastecimento destes sistemas do tipo fornos-fornalha, visando comparar e analisar, a qualidade do processo de carbonização neste sistema de produção, utilizando fornos com diferentes revestimentos sem emissão de gases poluentes a atmosfera.

2.3.2 Materiais e métodos

Para a produção do carvão vegetal foi utilizada a Unidade Demonstrativa da Universidade Federal de São João Del-Rei campus Sete Lagoas UFSJ/CSL, do sistema fornos-fornalha, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, contendo quatro fornos, com três revestimentos distintos, sendo dois, proveniente do revestimento padrão da Universidade Federal de Viçosa UFV, outro com material tradicional de composição argilosa com sílica “barrela”, mais utilizado em pequenos e médios produtores, e outro com revestimento oriundo de empresa particular, Refragan/Refracast tendo ampla atuação na área siderúrgica de revestimentos de fornos, até grandes produtores.

Os materiais da amostragem do carvão vegetal foram coletados após carbonização e abertura imediata dos fornos, bem como a madeira utilizada em cada forno foi coletada no instante exato de

enchimento, os quais foram levados para os Laboratório de Tecnologia da Madeira e Componentes Químicos e Anatômicos da UFSJ/CSL, para posteriores testes qualitativos e quantitativos para as análises e comparações.

2.3.3 Propriedades físicas da madeira e carvão vegetal

A carbonização foi realizada em fornos-fornalha, onde localizam o carvão vegetal gerado, Figura 7. O controle de aquecimento da temperatura durante as fases de carbonização foi realizado por meio de um pirômetro até atingir a temperatura final de 450°C.



Figura 7: Representação do carvão vegetal gerados em três fornos do Sistema fornos-fornalha, no qual foi realizado o processo de carbonização das toras de madeira, e posterior coleta do material amostral para análises.

A densidade relativa aparente/DRA, do carvão vegetal foi determinada de acordo com o método hidrostático, por meio de imersão em água, descrito na NBR 11941 (ABNT, 2003). As amostras de carvão vegetal foram colocadas em estufa a $(103 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, por duas horas para obter a massa seca e após isto, foram retiradas da estufa e pesadas em balança analítica, posteriormente, estas peças de carvão vegetal foram imersas em água (Figura 8) até saturação por aproximadamente 20 minutos para cada amostra de 500g, para determinação do volume deslocado, e em seguida a pesagem do peso úmido.



Figura 8: Representação da realização da densidade relativa aparente do carvão vegetal, utilizando massa úmida sobre volume saturado e deslocado.

Para a determinação da umidade das amostras da madeira, primeiramente foram retiradas amostras da pilha da madeira no pátio, representando diferentes diâmetros, e de todas as bordas da pilha, da parte inferior e superior, se atentando a ser o mais criterioso e representativo possível do material a ser enfiado. Após isto, foram retirados três discos, sendo dois a 25% da borda das toras e um no centro da tora, os quais foram pesados a massa úmida que encontrava as peças em umidade de equilíbrio com o meio e posteriormente foram levadas para estufa aquecida com circulação de ar a (103 ± 2) °C, até peso constante. Foi pesado a massa seca e realizou o cálculo da umidade das peças da madeira de base seca para cada forno, contudo, o teste de umidade foi realizado no dia exato do enfiamento, para evitar super ou subestimação dos resultados.

Para a determinação da densidade básica da madeira, foram retirados cunhas opostas, devidamente identificadas e imersos em água por um período até atingir sua completa saturação, após isto, foram pesadas e levadas para uma estufa com circulação de ar a (103 ± 2) °C até atingir peso constante para determinar a massa seca, sendo que, este método foi descrito por Kollmann & Côte (1968). Posteriormente foram então realizados os cálculos da densidade básica, dividindo a massa absolutamente seca pelo volume saturado. O rendimento gravimétrico da carbonização foi calculado por meio da relação de massa seca de carvão e massa seca de madeira, o qual foi pesado toda a madeira enfiada, e todo o carvão vegetal formado, com as devidas correções de umidade, para determinação da massa seca de ambos.

2.3.4 Propriedades químicas da madeira e análise química imediata do carvão vegetal

Para a avaliação dos teores de extrativos das toras de madeiras utilizadas nos fornos na carbonização foram retiradas cunhas opostas e identificadas de acordo com o forno, assim, as amostras foram descascadas para que não houvesse interferência nos resultados. Com o auxílio de uma plaina foram retiradas lascas de cada amostra para serem transformadas em serragem. Para isto, foi utilizado moinho tipo Wiler, e retirada a serragem. A mesma foi peneirada utilizando as malhas de 40 e 60 mesh, classificadas de acordo com a granulometria para posteriores análises. A análise do teor de extrativos, procedeu-se segundo a ABTCP M/68 e Norma Tappi T204-05-76 (1976). O teor de ligninas totais foi determinado de acordo com a Associação Brasileira de Técnica em Celulose e Papel M 11 (ABTCP, 1977).

Para a avaliação da análise química imediata, as amostras de carvão vegetal foram trituradas e peneiradas (Figura 9), utilizou-se a fração das amostras que ficou retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh, figura 3. A determinação dos teores de materiais voláteis (MV), foi realizada com auxílio da mufla, ou seja, forno elétrico de fonte externa (Figura 10), a 950°C, figura 4, por dois minutos (na porta da mufla para aclimação), três minutos no

centro e seis minutos no fundo da mufla, e os teores de cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) também foram determinados com auxílio da mufla, a 750°C, por seis horas, denominado calcinação, sendo que todos os teores seguiram os procedimentos preconizados e padronizados pela norma NBR 8112 (ABNT, 1986).



Figura 9: Representação do processo de redução granulométrica das amostras de carvão vegetal, e sua respectiva tamisação, para posteriormente serem levadas para a mufla.

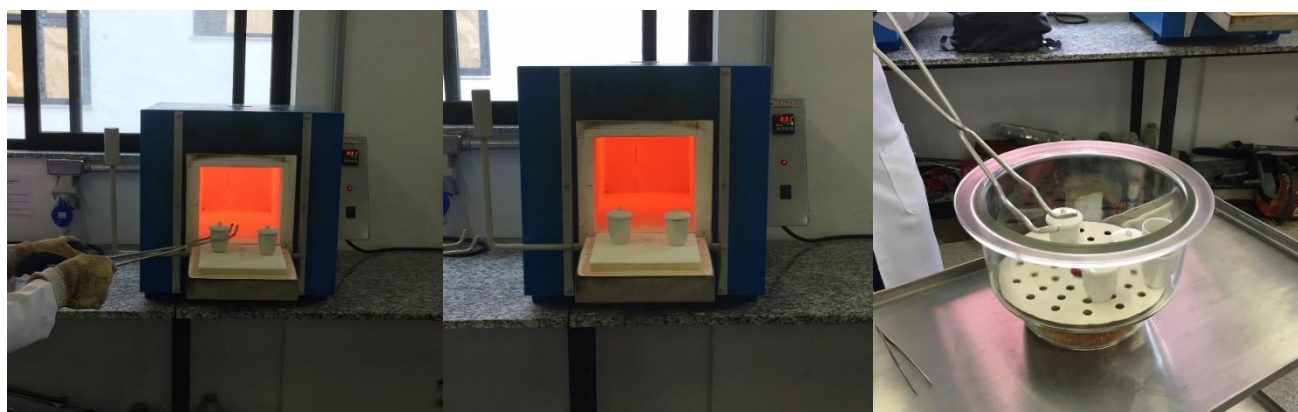


Figura 10: Representação da mufla forno elétrico adaptado de fonte externa, no qual foi realizado o processo de volatilização a 950°C um total de 11 minutos aproximadamente, das amostras de carvão vegetal, para estimar os teores de materiais voláteis nas amostras.

2.3.5 Resultados e Discussões

Os fornos possuem capacidades média de 6,3 toneladas de madeira, Tabela 1, sendo uma quantidade referente à quando se tem uma boa organização dentro dos fornos, buscando ter uma quantidade mínima de espaços vazios, que venham a interferir na qualidade e quantidade de carvão vegetal gerado no fim da carbonização. Contudo observa-se que no forno um as madeiras possuem um maior diâmetro médio de 16 cm aproximado, e os demais com diâmetros semelhantes, pois os mesmos a madeira são do mesmo local de origem ao contrário do primeiro forno.

Após a realização dos testes das propriedades físicas da madeira, obteve-se a umidade das amostras, Tabela 1, da madeira variando de 31 a 65%, sendo o forno um que contém a madeira mais seca dentro dos padrões aceitáveis “abaixo de 40%”, pois, apresentou um maior tempo de secagem da madeira. Já a média geral dos três fornos ficou com aproximadamente 53% estando acima dos limites adequados para se obter um carvão com características desejáveis para aplicação na siderurgia, contudo pode ser explicado pelo intenso período chuvoso que passa toda região sudeste do país, inclusive na cidade de Sete Lagoas, onde está inserido a unidade produtora, o que irá impactará na qualidade do carvão vegetal gerado.

No qual a umidade é uma variável de grande importância para o processo de carbonização, a qual, quanto maior o teor da umidade da madeira, maior a energia gasta para secar e retirar a água da madeira. Ocasionalmente se um menor rendimento gravimétrico da carbonização, além de influenciar o comportamento térmico da madeira frente a decomposição térmica dos componentes celulares da madeira (Oliveira et al., 2005).

Tabela 1: Representação das características das amostras de madeira, que passaram por processo de carbonização nos três fornos.

Análises da Madeira	Forno 1	Forno 2	Forno 3	Média Geral
Massa Total (kg)	6357.60	6311.20	6457.40	6375.40
Diâmetro Médio (cm)	16.50	9.59	9.91	12.00
Umidade Média (%)	31.17	63.37	65.09	53.21

De modo geral, as características da madeira variam para cada utilização, em que essas características estão diretamente dependentes das características anatômicas, físicas e químicas e, conseqüentemente, às propriedades de cada madeira para cada espécie avaliada. Assim, a importância de se avaliar o material a ser enfiado para obtenção do carvão vegetal, como forma de aumentar a rastreabilidade das lacunas a serem ajustadas durante a carbonização (Silva et al, 2015).

A densidade básica da madeira, como já visto, é determinada pela relação entre a massa seca constante e

seu respectivo volume saturado, a qual, influencia na utilização tecnológica da madeira, e no que se refere para a utilização energética. Sabe-se que, as madeiras de maiores densidades liberam mais energia durante a queima e produzem carvões mais densos, com maior concentração de carbono por área, isto varia para cada espécie ou clone e suas características anatômicas, bem como a qualidade da madeira enfiada (Froehlich & Moura, 2017).

Quirino et al., (2004), verificaram que densidade da madeira é diferenciada de acordo com as características anatômicas e químicas da madeira, tendo ainda, uma correlação positiva ao conteúdo calórico da madeira por unidade de volume, quando se trata de quantidade energética. Os valores de densidade básica encontrados para as amostras de madeira, são modernamente elevadas, Tabela 2, com um valor médio de 0,547 g/cm³, tendo a princípio uma boa indicação do uso energético a depender das demais análises químicas imediatas e do processo de carbonização serem em condições favoráveis e devidamente padronizadas principalmente no controle da temperatura das fases da carbonização.

Estudos de Lima et al. (2011), ao avaliarem a densidade básica média da madeira obtiveram um valor aproximado de 0,475 g/cm³, já pesquisas de Silva et al., (2015) encontraram um valor médio de 0,471 g/cm³, e Pereira et al. (2000) observaram um valor médio de 0,403 g/cm³, sendo todos estes, inferiores ao resultado encontrado nesta pesquisa. Reforçando a indicação da madeira para produção de carvão vegetal, importante ressaltar que todos estes autores, reafirmam, que a densidade energética se relaciona diretamente com a energia contida em um determinado volume de madeira, daí a importância de avaliar a densidade básica da madeira.

Soares et al., (2015) e Froehlich & Moura, (2017), ao avaliarem as características químicas e físicas do carvão vegetal e da madeira como fonte de matéria prima, indicaram que a densidade básica da madeira, o teor de extrativos, o teor de carbono e relação carbono hidrogênio da madeira são elevados com o passar da idade da árvore. Porém, ao se avaliar o carvão vegetal, observa-se que o teor de cinza, a relação sílica guaiacila, o teor de cinza e a relação carbono hidrogênio, são menores e são menores como passar da idade da árvore. Contudo, os maiores valores de rendimento gravimétrico do carvão vegetal foram encontrados no material mais maduro, sendo influenciada pelos valores de densidade básica da madeira e demais características anatômicas, o que evidencia estabelecer uma detalhada caracterização tanto da madeira matéria prima, quanto do carvão para melhor escolha do clone e melhor planejamento visando a viabilidade da propriedade.

Tabela 2: Representação da densidade básica das amostras de madeiras as quais foram carbonizadas nos três fornos.

Unidades	Densidade Básica (g/cm ³)	Teor Extrativo (%)	Teor Lignina (%)	RG (%)	U.M (%)	DRA (g/cm ³)
Forno 1	0.677	4.34	24.52	34.00	31.2	0.444
Forno 2	0.491	3.48	22.38	25.00	63.4	0.330

Forno 3	0.491	3.48	22.38	18.00	65.1	0.349
Média geral	0.547	3.91	23.45	26.00	53.2	0.374

RG: Rendimento gravimétrico da carbonização; UM: Umidade da madeira.

Foi encontrada uma variação de rendimento entre 18% e 34%, com a média entre os valores de rendimento gravimétrico entre os três fornos de 26%. Exceção do forno 4, que não foi possível finalizar as coletas de dados, devido a paralização das atividades devido ao coronavirus. O primeiro forno obteve rendimento gravimétrico de 34%, a madeira enfiada possuía a menor umidade (31,2%), maior densidade (0,677 g/cm³) e o processo de carbonização foi conduzido pela equipe técnica da UFV, com o acompanhamento da equipe técnica da UFSJ e participantes do curso teórico/prático em produção sustentável de carvão vegetal. O segundo forno, a umidade da madeira (63,4%) foi superior ao do primeiro, a densidade (0,491 g/cm³) inferior, sendo o processo de carbonização iniciado pela equipe técnica da UFV e findado pela equipe técnica da UFSJ. O terceiro forno com umidade da madeira de maior valor (65.1%), pois a madeira ficou exposta por um tempo superior no pátio, densidade também de 0,491 g/cm³ e com maior tempo de carbonização, pois o termometro laser digital infravermelho estragou durante o final de semana, ficando a condução do processo de carbonização de forma empírica, assim contribuindo para a queda do rendimento gravimétrico da carbonização, desta forma fica evidente a necessidade do acompanhamento da temperatura por meio de um termometro laser digital infravermelho durante o processo de carbonização, como também o treinamento dos operadores para a boa condução do processo de carbonização.

No que se refere a densidade relativa aparente do carvão vegetal, pode-se observar, Tabela 2, valor médio em 0,374 g/cm³, o qual houve uma redução ao se comparar com valores da densidade básica da madeira, isto, devido ao processo de carbonização ser em temperatura elevada, devido as características anatômicas da madeira e carvão serem distintas, graças ao intenso período chuvoso na unidade produtora, a madeira extremamente úmida, principalmente para os fornos dois e três. Contudo, o valor encontrado nesta pesquisa se encontra abaixo do limite, quando se trata madeira para uso energético, pois, Cruz et al., (2015), encontraram um valor médio de 0,470 g/cm³, contudo, superior ao resultado de Botrel et al. (2007) que encontraram um valor médio de 0,336 g/cm³ em híbridos de eucalipto.

No qual, essa divergência de valores se dá graças as características distintas anatômicas, e pela variação da densidade básica da madeira utilizada salientando ainda, a relação positiva entre a densidade do carvão e da madeira de origem. Contudo devido a ocorrer alterações nos processos de carbonização, a extrema e elevada umidade da madeira, ao intenso período chuvoso diretamente sobre os fornos durante a carbonização, são alguns dos fatores que vieram a interferir no resultado abaixo da exigência de qualidade.

E esta relação, fica ainda mais evidente ao se comparar os resultados dos fornos um com os demais, o qual obteve uma maior densidade relativa aparente, contudo a madeira de origem possuía uma umidade

média inferior a 40 %, o que não ocorreu com os fornos dois e três, que a madeira apresentou uma umidade média acima de 60 %, e valores inferiores da densidade. Com isto, fica evidente salientar a importância de verificação das variáveis referentes ao carvão vegetal e da matéria prima, como forma de rastreamento da cadeia produtiva.

Oliveira et al. (2010), destacaram que a madeira possui contrações longitudinais e transversais, além de ser um material anisotrópico, que podem interferem na utilização da madeira, o qual pode ser atenuado, por meio de técnicas de processamento da madeira, que respeitem o princípio da retratibilidade. Ainda frisa que essa característica de anisotropia é interessante, ao carvão vegetal, devido a deformação da madeira no momento da perda da água no processo de secagem e da carbonização, devido a ser menor em relação a madeiras com altos valores retratibilidade, dessa forma, uma menor tendência na quantidade e intensidade de rachaduras e empenamentos, ocasionando uma melhora na qualidade do carvão vegetal formado.

Como já estabelecido e bem aceito em relação a densidade básica da madeira, sabe-se que, a madeira mais densa tende a ter um carvão vegetal mais denso, contudo a depender do volume de madeira e da capacidade do forno, quando se obtém um carvão vegetal mais denso resulta num maior rendimento volumétrico, pois quanto maior a densidade da madeira, maior será a quantidade de matéria-seca por unidade de volume de carvão vegetal. Nota-se que a madeira apresentou uma densidade elevada ao se comparar ao carvão vegetal para os três fornos estudados, indicando uma perda expressiva da massa, pois, durante o processo de carbonização nos respectivos fornos, nos quais ocorreram queima do material.

O teor de extrativo da madeira enfiada apresentou uma média geral de 3.91%, sendo o forno um, com o maior percentual de extrativo, e 23.45% para o teor médio de lignina da madeira. Contudo, pode observar que se encontra dentro dos padrões aceitáveis para madeiras utilizadas na energia da biomassa de base florestal, assim como os dados encontrado por Benites et al., (2018), que estudaram a caracterização tecnológica para diversos clones de eucaliptos, foram semelhantes também ao encontrado por Santana et al. (2012) para a madeira de *Eucalyptus urograndis* aos 48 meses 3,27%, e para o *Eucalyptus grandis*, os valores foram semelhantes aos obtidos por Rocha et al. 2012, aos 85 meses 2,1%, e por fim semelhantes ao encontrado no estudo de Trugilho et al., (2001) que observaram um valor de 4,5 a 6,5%. Contudo os valores encontrados estão dentro do estabelecido quando se trata de dados energéticos para a obtenção de carvão vegetal.

Ainda com relação à composição química da madeira sabe-se que quanto maior for o teor de substâncias aromática na madeira, a variar com a espécie, substâncias como: extrativos e lignina, tem-se a formação de um carvão vegetal mais denso e mais resistente no que se refere às propriedades físico-mecânicas, além disso, quando o teor em lignina for elevado, pode resultar num carvão vegetal também com maior poder calorífico, daí a busca por híbridos/clones ou espécies que possuem tais características químicas associadas a demais requeridas pela madeira (Brito & Barrichelo, 1977; Orellana, 2015).

Com relação a análise química imediata, Tabela 3, as amostras de carvão vegetal obtiveram, um erro de amostragem da umidade inferior a cinco por cento, sendo ideal para indicar uma homogeneidade do processo de avaliação, sendo as duas replicadas e aptas para posteriores análises. As amostras possuem teor de materiais voláteis variando de 8,0 a 20%, com média geral de 14.73% observando uma variação entre o forno um aos demais, devido a madeira ser de origem distinta aos demais.

A umidade do carvão vegetal contido nos fornos, pode-se observar que, apresentaram um valor médio de aproximadamente 7%, sendo explicado pelo intenso período chuvoso, o que corrobora para alteração da massa do carvão vegetal. Mesmo o carvão vegetal estando alocado dentro dos fornos, com a intensa chuva, as paredes dos fornos ficam extremamente úmidas e acabam trocando umidade com o meio. Contudo o forno três apresentou uma maior umidade do carvão vegetal, devido ao seu revestimento ser inferior aos demais, visto que os fornos um e dois, possuem o mesmo tipo de revestimento sendo da UFV, o forno três detem do revestimento da empresa Refragan/Refracast, o que evidencia a princípio a interferência do revestimento na qualidade final do carvão vegetal, tendo em vista que os três fornos passaram pelas mesmas condições climáticas e foram carbonizados no mesmo período.

Já para o teor de cinzas apresentaram valores abaixo de 2% sendo ideal, pois indica uma baixa formação de cinzas durante e após a utilização nos alto-fornos das siderurgias, assim como indicado por Santos et al., (2011) e Benites et al., (2018). O teor de carbono fixo, ficaram com valores variando de 79,0 a 90%, sendo valores extremamente elevados, e excelentes para a obtenção de um material energético, pois quanto maior a concentração de carbono fixo maior o poder calorífico das peças de carvão vegetal. Contudo o forno um, apresenta um menor teor de carbono fixo, o que pode estar relacionado ao seu maior teor de material volátil, o que acaba por interferir na fixação do carbono durante a carbonização. E vale ressaltar, que a madeira utilizada no forno um, não foi plantada com fins energéticos, daí tais influências nos resultados químicos do carvão vegetal.

Estudos de Santos, et al. (2012), ao avaliarem quatro materiais genéticos de clones de eucalipto obtiveram teores de cinzas entre 0,4 e 0,8%, matérias voláteis entre 11 e 15% e carbono fixo entre 85 e 88%. O qual pode ser observado serem aproximados ao encontrado nesta avaliação, que evidencia a princípio um bom valor a ser obtido, já que foi a primeira carbonização dos três fornos e pela interferência do intenso período chuvoso. Mas, pode ser explicado também pelo fato de serem matérias primas distintas de clones diferentes, com características anatômicas e químicas divergentes o que evidencia médias distintas.

Tabela 3: Representação da Análise Química Imediata, das amostras de carvão vegetal, com duas replicatas, com objetivo de avaliar a qualidade das amostras e de todo processo de carbonização na mufla.

Amostras		Umidade (%)	Teor Materiais Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono Fixo (%)
Forno 1	F1	6.58	20.44	0.49	79.07
	F1	6.85	20.59	0.32	79.09
Forno 2	F2	6.43	15.93	0.78	83.29
	F2	6.33	16.07	0.89	83.03
Forno 3	F3	10.65	7.33	1.32	91.35
	F3	10.17	8.02	1.59	90.39
Média Geral		7.83	14.73	0.90	84.37

Brito & Barrichelo, (1977), ao avaliarem as correlações entre o rendimento gravimétrico e o teor de carbono fixo, concluíram que possuem relações positivas, contudo na literatura se verifica uma variação inversamente proporcional. Porém, ao se avaliar a temperatura, ou seja, quando se tem a elevação da temperatura de carbonização tende a ocasionar uma diminuição do rendimento e aumentar a percentagem de carbono fixo, no caso deve-se ter atenção com o equilíbrio entre tempo e temperatura de toda a carbonização.

Estudos de Brito e Barrichelo (1977) estabeleceram que a escolha de madeira com objetivo de se obter carvão vegetal, seja necessário apresentarem elevados teores em carbono fixo e menores teores em materiais voláteis e cinzas, assim como também, em espécies que possuam altos teores de lignina e densidade básica, para que dessa forma, possibilite um maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal, e dependendo da quantidade de matéria seca colocada no forno bem como da qualidade do processo de carbonização torna-se possível e viável à obtenção de maior rendimento volumétrico, além de agregar maior valor ao carvão vegetal.

Como se sabe, o teor de carbono fixo é definido como a quantidade de carbono presente no carvão vegetal, e seu rendimento possui uma relação direta com o percentual de lignina, extrativos e massa específica da madeira, porém, inversamente proporcional ao teor de holocelulose, sendo uma variável de suma importância a ser avaliada na análise química imediata (Oliveira, 1988). O teor de carbono fixo das amostras consideradas nesta avaliação, são relativamente altos, evidenciando a indicação da madeira para o uso energético, porém para obter tal valor, deve-se ter um melhoramento das técnicas de carbonização no campo no sistema produtivo, além de ser padronizado, assim como foi avaliado por Andrade et al., (2019), os quais encontraram valores semelhantes por meio das técnicas de melhoramento da madeira na etapa da silvicultura, e indicou as matérias primas para o uso energético, contudo, saber a origem do material a ser utilizado é fundamental para tais avaliações do processo de carbonização e rastreamento das divergências.

Carmo (1988) e Cotta, (1996), conceituam os materiais voláteis como substâncias que não estão ligadas na madeira, tais como: os gases da carbonização e da queima do carvão, já as cinzas são componentes minerais oriundas do lenho e da casca durante o ciclo de vida do indivíduo. Contudo os teores de cinza na

casca é mais elevado, assim, quanto maior for a presença de materiais minerais na madeira, maior a produção de cinzas no carvão vegetal, que se torna indesejável para a produção, devido a exigir manutenções recorrentes e grande perda no rendimento do carvão vegetal, além de gerar maior quantidade de resíduo durante os ciclos de carbonização nos fornos.

Andrade et al., (2019) afirmaram que, para fins de análises e comparações dos testes químicos do carvão vegetal e madeira, somente com o rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo quando analisados de forma separadas, não são suficientes para meios de comparação e determinação da eficiência do sistema produtivo de carvão vegetal, assim sugere-se como uma alternativa a mais, o indicador do rendimento em carbono fixo, o qual reflete em seu índice. Dessa forma, deve-se considerar para a avaliação um conjunto de variáveis, sendo elas químicas, físicas associadas as condições ambientais e de qualidade do sistema de produção, bem como aqueles inerentes do processo de armazenagem, transporte, enchimento dos fornos, organização diamétrica das peças de madeira dentro dos fornos, controle das fases da carbonização, presença constante na praça de carbonização, dentre outros, como fatores preponderantes na qualidade final do carvão vegetal a ser utilizado nas siderurgias.

Contudo, de forma geral a análise da composição química imediata, refere-se principalmente ao teor de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas presentes na massa da madeira que gerou o carvão vegetal, e de forma geral, conhecendo o teor de materiais voláteis, pode-se prever o grau de combustão de um combustível, neste caso o carvão vegetal, ou seja, o carvão vegetal com maiores teores de carbono fixo. Consequentemente um menor teor de voláteis, queimarão mais lentamente, sendo assim, mais desejável para as siderurgias em seus alto-fornos, pois aumenta o rendimento do carvão vegetal para a produção do ferro gusa.

2.3.6 Conclusões

Analisado o exposto acima, nota-se que foi possível realizar as carbonizações utilizando o sistema fornos-fornalha, na unidade demonstrativa junto à UFSJ/CSL, com as seguintes conclusões:

O carvão vegetal produzido pelo forno 1 obteve valores médios de umidade de 6,72%; teor de materiais voláteis de 20,52%, teor de cinzas de 0,41%, teor de carbono fixo de 79,08%; rendimento gravimétrico da carbonização de 34%, densidade relativa aparente de 0,444 g/cm³.

O carvão vegetal produzido pelo forno 2 obteve valores médios de umidade de 6,38%; teor de materiais voláteis de 16%, teor de cinzas de 0,84%, teor de carbono fixo de 83,16%; rendimento gravimétrico de 25%, densidade relativa aparente de 0,330 g/cm³.

O carvão vegetal produzido pelo forno 3 obteve valores médios de umidade de 10,41%; teor de materiais voláteis de 7,68%, teor de cinzas de 0,46%, teor de carbono fixo de 90,87%; rendimento gravimétrico de 18%, densidade relativa aparente de 0,349 g/cm³.

A necessidade evidente do acompanhamento da temperatura por meio de um termômetro laser digital infravermelho durante o processo de carbonização, como também o treinamento dos operadores para

a boa condução do processo de carbonização.

2.3.7 Referências Bibliográficas.

ANDRADE, C., MAYER, S. L. S., FERRAZ, F. A., MARCHESAN, R., ROSSI, L., & DA SILVA, D. A. 2019. Propriedades energéticas da madeira e do carvão de *Hovenia dulcis* Thunberg. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 10(2).

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 8112: Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7402 Carvão vegetal - Determinação granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9165 Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633: Carvão vegetal: Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, ABNT, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. AMS (2019). Plantios de reflorestamento no Estado para fins energéticos. Belo Horizonte, MG. Disponível em: < <http://silviminas.com.br/>>. Acesso em: 08 de Dezembro de 2019.

BENITES, P. K. R. M., DA SILVA LOPES, A., GOUVÊA, A. D. F. G., DA SILVA, F. C., & DE SOUZA, C. C. B. (2018). Caracterização tecnológica da madeira de híbridos de eucalipto irrigados e fertirrigados. *Ciência Florestal*, 28(4), 1716-1728.

BOTREL, M.C.G., TRUGILHO, P.F., ROSADO, S.C.S. & SILVA, J.R.M. (2007). Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, 31 (3), 391-398.

BRITO, J. O., & BARRICHELO, L. E. G. (1977). Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. *IPEF, Piracicaba*, 14(14), 9-20.

BRITO, JOSÉ OTÁVIO et al (1993). Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Piracicaba: IPEF, 1993.

CARMO, J. S. (1988) Propriedades Físicas e Químicas do Carvão Vegetal Destinado a Siderurgia e Metalurgia. Monografia de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

COTTA, A. M. G. (1996) Qualidade do carvão vegetal para siderurgia. Monografia de Graduação, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.

- CRUZ, C. R., FERREIRA, R. S., & ALMEIDA, J. M. (2015). Propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. cultivados na região do Recôncavo da Bahia. *MAGISTRA*, 27(2), 188-198.
- FIGUEIRÓ, CLARISSA GUSMÃO (2018). Caracterização espacial das propriedades do carvão Vegetal em estoques industriais. Viçosa, MG, 2018. Viii, 92p.
- FONTES, A. A., SILVA, M. L. D., & LIMA, J. E. D. (2005). Integração espacial no mercado mineiro de carvão vegetal. *Revista àrvore*, 29(6), 937-946.
- FROELICH, P. L., & MOURA, A. (2017). Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. *Revista Tecnologia e Tendências*, 9(1), 13-32.
- GONÇALVES et al. 2017. Engenharia madeireira: pesquisa e produção. Edur UFRRJ. Seropédica, RJ. Vol1. 250p.
- INDUSTRIA BRASILEIRA DE ARVORES (2019). O setor panorama brasileiro: Carvão Vegetal. São Paulo. Disponível em: <https://www.iba.org/carvao-vegetal-2>. Acesso em 06 dez 2019.
- LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 31, n. 65, p. 09-17, jan./mar. 2011. DOI: 10.4336/2010.pfb.31.65.09.
- OLIVEIRA, E. de (1988). Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex- Maiden (47f.) Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.
- OLIVEIRA, J. T. D. S., HELLMEISTER, J. C., & TOMAZELLO FILHO, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore*, 29(1), 115-127.
- OLIVEIRA, J. T. S. TOMAZELLO FILHO, M. E & FIEDLER, N. C. (2010). Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, Viçosa, Minas Gerais, 34 (5), 929-936.
- ORELLANA, J. B. P. (2015). Valorização tecnológica da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente plantios de dois sítios distintos localizados no estado do Amapá.
- PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).
- PESSOA, S. T., & DE PÁDUA RIBEIRO, L. M. (2017). Investment analysis in eucalyptus plantation in a small rural property in Bom Despacho City/MG. CEP, 35701, 970.
- QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos ligno-celulósicos. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.
- REZENDE, J. L. P., COELHO, L. M., DE OLIVEIRA, A. D., & SÁFADI, T. (2005). Análise dos preços de carvão vegetal em quatro regiões no estado de Minas Gerais. *Cerne*, 11(3), 237-252.
- ROCHA, M. F. V. et al (2012). Efeito da Idade e do Espaçamento nas propriedades da madeira para Energia. *Biomassa & Energia*, Viçosa, MG, v. 5, p. 27, 2012.
- ROSA, RAFAEL AMORIM et al. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. *Journal of*

Biotechnology and Biodiversity, v. 3, n. 2, 2012.

SANTANA, W. M. S. et al (2012). Effect of age and diameter class on the properties of wood from clonal Eucalyptus. Cerne, Lavras, v. 18, n. 1, p. 1-8, jan./mar. 2012.

SANTOS, R. C. et al (2011). 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, jun. 2011.

SANTOS, R. C., CARNEIRO, A. C. O., TRUGILHO, P. F., MENDES, L. M. & CARVALHO, A. M. M. L. (2012) Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. Cerne, Lavras, Minas Gerais, 18 (1), 143-151.

SILVA, D. A., MULLER, B. V., KUIASKI, E. C., ELOY, E., BEHLING, A., & COLAÇO, C. M. (2015). Propriedades da madeira de Eucalyptus benthamii para produção de energia. Pesquisa Florestal Brasileira, 35(84), 481-485.

SIMIONI, F. J., MOREIRA, J. M. M. Á. P., FACHINELLO, A. L., DE ALMEIDA BUSCHINELLI, C. C., & MATSUURA, M. I. D. S. F. (2017). Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. Ciência Florestal, 27(2), 731-741.

SOARES, V. C., BIANCHI, M. L., TRUGILHO, P. F., HÖFLER, J., & PEREIRA, A. J. (2015). Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. Cerne, 21(2), 191-197.

TRUGILHO, P. F. et al (2001). Avaliação de clones de Eucalyptus para produção de carvão vegetal. Cerne, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.