

CARVÃO VEGETAL: PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E PRINCIPAIS APLICAÇÕES

FROELICH, Paulo Leandro¹; MOURA, Angela B. D.²

RESUMO

O Brasil ocupa o primeiro lugar na produção mundial de carvão vegetal. Cerca de 85% do carvão produzido é utilizado nas indústrias, as residências respondem por 9% do consumo e o setor comercial, como pizzarias, padarias e churrascarias, 1,5%. Em 2007, 34% de todo o ferro-gusa foi produzido em altos fornos a carvão vegetal (SINDIFER, 2007), sendo o Brasil o maior produtor no mundo nesse setor. O carvão vegetal é considerado um dos melhores redutores para uso siderúrgico, apresentando um maior grau de pureza em relação ao carvão mineral, um baixo teor de enxofre e cinzas. O teor de carbono fixo do carvão vegetal é uma das características mais importantes no procedimento de qualificação, uma vez que está diretamente correlacionado com o poder calorífico. Sabendo-se da atual importância do Carvão Vegetal na economia e que é um recurso energético renovável, justificam-se estudos e pesquisas com o objetivo de aprimorar as técnicas existentes e desenvolver novas para aprimorar suas propriedades e até mesmo chegar a novas aplicações. Neste trabalho de revisão, apresentam-se as principais aplicações desse material, bem como propriedades e normas utilizadas na sua caracterização.

Palavras-chave: Carvão vegetal. Biomassa. Propriedades do carvão vegetal.

ABSTRACT

Brazil occupies the first place in the world-wide production of vegetal coal. About 85% of the produced coal it is used in the industries, the residences answer for 9% of the consumption and the commercial sector as pizzarias, bakeries and restaurants 1.5%. In 2007, 34% of all the iron-gusa were produced in high ovens the vegetal coal, being Brazil the producing greater in the world in this way. The vegetal coal is considered one of the best reducing for siderurgical use, presenting a bigger degree of pureness in relation to the mineral coal, a low sulphur text and leached ashes. The fixed carbon text of the vegetal coal is one of the characteristics most important in the qualification procedure, a time that directly is correlated with the calorific power. Knowing itself of the current importance of the Vegetal Coal in the economy and that it is a renewable energy resource, studies and research with the objective are justified to improve the existing techniques and to develop new to improve its properties. In this work of revision the main applications of this material are presented, as well as properties and norms used in its characterization.

Keywords: Vegetal coal. Biomass. Properties of vegetal coal.

¹ Analista Tecnologia da Informação – Bunge Alimentos S/A, Bairro Nossa Senhora Aparecida, Passo Fundo.

² Professora e Pesquisadora da Feevale, Dr.ª em Engenharia, Grupo de pesquisas em materiais, Vila Nova, Novo Hamburgo.

1 INTRODUÇÃO

A madeira tem um papel importante no Brasil como fonte de energia desde o período colonial. As florestas nativas brasileiras cobrem 415,9 milhões de hectares e correspondem a 31,1% do total de florestas do mundo; já a área reflorestada de 5,4 milhões de hectares é a oitava maior do mundo e cresce 21 mil hectares por ano (FAO, 2006).

O carvão vegetal é um importante subproduto da madeira obtido através de um processo conhecido como Pirólise. O tipo de madeira tem forte influência na qualidade e nas propriedades que mais se desejam no carvão de acordo com seu destino, seja ele industrial, doméstico ou comercial.

O Brasil faz uso do carvão vegetal na produção industrial e a tendência atual é de que a demanda aumente nos próximos anos, devido principalmente ao aumento das áreas de reflorestamento e por ser uma fonte de energia renovável.

O principal objetivo do estudo das propriedades e aplicações do carvão vegetal é verificar o estado em que se encontram os processos disponíveis para sua obtenção, bem como avaliar as possibilidades do emprego de tecnologias inovadoras em vários países, principalmente porque o Brasil desperdiça muita energia e subprodutos por empregar métodos arcaicos na sua obtenção.

O Brasil ocupa o primeiro lugar na produção mundial de carvão vegetal e, segundo o pesquisador da Embrapa Florestas, Antonio Francisco Bellote, o Brasil deve investir cada vez mais no plantio de florestas para fins comerciais. Durante o *Simpósio Brasil-França de Energia: novos atores, novas relações geopolíticas e o papel da agroenergia*, realizado em São Paulo, no dia 09 de setembro de 2009, Bellote explicou que o país produziu um volume de 10 milhões de toneladas de carvão vegetal em 2008 (representando o consumo de, pelo menos, 60 milhões de metros cúbicos de madeira) (BRITO, 2009) e, atualmente, a demanda pela fonte de energia é maior que a oferta. “Por isso seria necessário aumentar a área plantada para ampliar a matéria-prima do carvão vegetal, investir em novas tecnologias de conversão mais eficientes e sustentáveis e incentivar o plantio em áreas não tradicionais, mas que têm grande potencial” (BELLOTE, 2009).

Cerca de 85% do carvão produzido é utilizado nas indústrias; as residências respondem por 9% do consumo e o setor comercial, como pizzarias, padarias e churrascarias, 1,5%. Em 2007, 34% de todo o ferro-gusa foi produzido em altos fornos a carvão vegetal (SINDIFER, 2007), sendo o Brasil o maior produtor no mundo nesse setor. O uso de carvão vegetal como redutor do minério

de ferro no Brasil data de 1591 em fundições artesanais, para produzir ferramentas de uso agrícola na então colônia de Portugal.

O carvão vegetal pode ser considerado como vetor energético de uso amplo, tanto que, após o primeiro choque de preço do petróleo (1973), foi estimulada, pelo Governo Federal, a substituição do óleo combustível por carvão em vários setores da produção industrial, cabendo ao carvão vegetal uma participação expressiva nesse esforço. Entretanto, é na indústria metalúrgica que ele encontra seu melhor nicho de mercado por favorecer a produção de ferro-gusa, principalmente por ser praticamente isento de enxofre, fósforo e outros elementos indesejáveis. Essa indústria consome cerca de 90% de todo o carvão vegetal produzido no Brasil, com o setor de ferro-gusa e aço detendo quase 85% do consumo de carvão (PATUSCO, 2006).

Durante muitos anos, a produção e a demanda de carvão vegetal no Brasil foram vistas como uma matriz energética responsável por contribuir com o aquecimento global e sempre foram alvo dos ambientalistas que combatem a destruição de matas nativas, principalmente no Centro-Oeste (Minas Gerais e Goiás), e, nos últimos anos, na região Norte (Mato-Grosso e Pará). Existia também nas áreas de produção o trabalho considerado escravo, em condições humanas inaceitáveis e em locais onde a mão de obra de crianças era utilizada sem escrúpulos. Isso rendeu ao Brasil sérias críticas por parte da ONU, principalmente no que tange ao desrespeito aos direitos humanos. Porém, as áreas de reflorestamento, principalmente de Eucalipto, aumentaram consideravelmente nas últimas duas décadas devido a algumas mudanças nas leis ambientais, pelo alto grau de adaptabilidade do Eucalipto ao nosso clima e pela busca da sustentabilidade por parte de muitas empresas. Assim, o carvão vegetal despertou o interesse de pesquisadores e da iniciativa privada, passando a ser visto como alternativa para o sequestro de carbono e como matriz energética menos poluente e renovável.

Enquanto o coque (carvão mineral) emite, desde sua extração até a queima nos fornos siderúrgicos, 1,65 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) e fixa 1,53 toneladas de oxigênio por tonelada de aço produzida, o carvão vegetal sequestra 16,33 t de CO_2 e regenera a mesma quantidade de oxigênio por tonelada de aço. Enquanto o coque libera sete quilos de óxido de enxofre (SO_2), o carvão vegetal é praticamente isento dessa substância (FERREIRA, 2006).

Os progressos alcançados, principalmente em termos de produtividade da madeira, têm sido expressivos. Observa-se que existe um grande interesse em se realizar trabalhos conjuntos entre os setores florestal e industrial, na busca de matéria-prima que apresente elevada

produtividade e qualidade. De modo geral, pode-se melhorar, modificar, controlar ou minimizar os fatores que afetam a qualidade da madeira, por meio de tratamentos silviculturais e de seleção, melhoramento e manipulação genética (XAVIER *et al.*, 1997).

Para compreendermos melhor toda a cadeia do Carvão Vegetal, torna-se necessário o estudo pormenorizado de suas principais aplicações, onde se encontra seu nicho e por que sua aplicação é tão ampla.

2 PRINCIPAIS APLICAÇÕES DO CARVÃO VEGETAL

A produção de carvão vegetal a partir de florestas nativas caiu 81,8% no período entre 1989 e 1997, porém cresceu novamente a partir deste último ano, como resultado do aumento da produção de carvão vegetal na região Norte do país. A situação mais preocupante ocorre na Amazônia e no Cerrado. Os principais estados produtores de carvão vegetal de origem nativa, em 2005, foram Bahia, Mato Grosso do Sul, Maranhão, Goiás e Minas Gerais. Esses estados produziram, respectivamente, 26,9%, 18,8%, 16,9%, 10,8% e 10,4% da produção nacional (IBGE, 2006).

Embora ocorra um aumento no reflorestamento, em Minas Gerais, o principal estado produtor de ferro-gusa, levantamentos da Secretaria da Fazenda do Estado (MINAS GERAIS, 2007) mostram que pelo menos 11,5% da produção de carvão vegetal ainda vêm de fontes ilegais e, nos últimos três anos, pelo menos 6.600 hectares foram desmatados ilegalmente para produzir carvão vegetal.

No Rio Grande do Sul, a maior produção de carvão vegetal é proveniente da acácia-negra e sua produção é destinada principalmente ao consumo residencial e para churrascarias. A acácia-negra contém altos percentuais de tanino em sua casca, de até 40% em base seca (HUANG *et al.*, 1993, *apud* BORGES JÚNIOR *et al.*, 2004). Principalmente no Estado do Rio Grande do Sul, a acácia-negra é plantada para fins comerciais, cobrindo cerca de 140.000 ha (TONIETTO; STEIN, 1997). A maioria dessas plantações encontra-se em pequenas propriedades rurais, com participação de mais de 10.000 produtores (HIGA *et al.*, 1998). A madeira é utilizada na fabricação de celulose, aglomerado e obtenção de energia pela produção de carvão vegetal (CALDEIRA *et al.*, 2002, 2003, 2004). Da casca é extraído o tanino, que é empregado na indústria farmacêutica e

coureira, entre outras (BYRNE; NAGLE, 1997). Entre as vantagens do cultivo da acácia-negra, está o fato de que a planta fixa nitrogênio no solo, sendo útil na recuperação de áreas degradadas.

O carvão vegetal é considerado um dos melhores redutores para uso siderúrgico, apresentando um maior grau de pureza em relação ao carvão mineral, um baixo teor de enxofre e cinzas. Vários parâmetros são utilizados para avaliar a qualidade do carvão vegetal. Dentre esses, está o poder calorífico superior que é obtido por bomba calorimétrica. BRITO (1996) afirma que, para o carvão vegetal, o poder calorífico depende da madeira que o originou e da temperatura máxima em que foi produzido. A determinação do poder calorífico em bomba calorimétrica é um processo que requer treinamento e tempo para realização, portanto, segundo GOMIDE (1979), algumas expressões empíricas utilizam os resultados da análise imediata (teor de carbono fixo, matéria volátil) para estimativa do poder calorífico superior.

Esse produto, em função de suas características físico-químicas, também é usado na medicina, nesse caso, chamado de Carvão Ativado, oriundo de determinadas madeiras de aspecto mole e não resinosas. O carvão vegetal tem sido utilizado desde a Antiguidade, na civilização egípcia, tinha seu uso difundido na purificação de óleos e uso medicinal. Na Segunda Guerra, serviu para a retirada de gases tóxicos a partir de sua elevada capacidade de absorver impurezas sem alterar sua estrutura, devido à sua composição porosa. No Brasil, há relatos de uso de carvão vegetal por parte dos índios, que misturavam a substância com gorduras de animais com a finalidade de combater doenças, como tumores e úlceras (FREITAS, 2009).

O carvão também se destaca na condução de oxigênio e é um eficiente disseminador de toxinas, pois apresenta a capacidade de adsorver considerável quantidade de gases que são produtos da decomposição alimentar formados pela ação bacteriana e oxigênio. O oxigênio participa do processo da formação de gases, já que acelera a decomposição dos alimentos presentes no conteúdo fecal. Diante de várias indicações positivas do carvão, pode-se destacar o seu uso no tratamento de dores estomacais, mau hálito, aftas, gases intestinais, diarreias infecciosas, disenteria hepática e intoxicações. Supõe-se que tal atividade se deva ao poder de adsorção do carvão ativado, de substratos que produzem gases sob a ação de bactérias do trato gastrointestinal. Nesses estudos o carvão ativado se mostrou seguro, sem efeitos adversos e efetivo no tratamento da flatulência.

Suas propriedades adsorventes são determinadas não somente por sua estrutura porosa, mas por sua constituição química. É um notável condutor de oxigênio, sendo um extraordinário

eliminador de toxinas. Devido a sua rapidez de ação, o carvão vegetal é considerado um agente útil no tratamento de envenenamentos. O carvão ativado se liga ao tóxico residual no lúmen do trato gastrointestinal e reduz rapidamente a absorção deste. O carvão ativado pode interromper a circulação entero-hepática das drogas tóxicas e aumentar o ritmo de eliminação de tóxico no organismo. Age também adsorvendo gases produzidos pela fermentação intestinal, evitando dores no aparelho digestivo e flatulências (ESULC, 2009).

A fumaça resultante da produção de carvão pode ser utilizada para a obtenção de adubos, fertilizantes e até repelentes. As emissões podem ser facilmente retidas acrescentando-se coletores nos fornos de alvenaria. Com isso, é possível reduzir a emissão de fumaça para reduzir os danos ao meio ambiente e gerar o extrato pirolenhoso, substância que pode ser empregada para vários fins, e o custo é relativamente baixo para as vantagens que oferece.

Galinhas poedeiras criadas na Universidade Estadual Paulista (Unesp) de Jaboticabal estão produzindo ovos mais saudáveis para consumo humano, com 22% menos colesterol. A tecnologia, desenvolvida pelo professor Pedro Alves de Souza, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), consiste em acrescentar à ração uma pequena quantidade de resíduos de carvão vegetal, o mesmo usado em churrasqueiras. Ele atingiu o melhor índice já alcançado em pesquisas de redução de colesterol com base na dieta das aves. Uma solução simples, barata e natural que também reduziu o colesterol da carne das aves em 34%, aumentou a postura em 2,55% e reduziu em 27% o número de ovos trincados. "Isso pode parecer pouco, mas, na prática, para quem é obrigado a seguir uma dieta rígida, faz muita diferença", afirma. Além de reduzir o colesterol no ovo, o pesquisador demonstrou que a técnica é ainda mais eficiente em relação à carne das aves: o colesterol foi reduzido em até 34%. Embora a carne branca seja uma das menos problemáticas em relação ao colesterol - 100 g de peito de frango têm 75 mg de colesterol, enquanto a mesma quantidade de carne vermelha magra tem 90 mg -, essa redução também pode aliviar o peso das restrições impostas no tratamento (SOUZA, 2009).

Segundo o coordenador da pesquisa, os resultados não favorecem apenas o consumidor. A adição de resíduos de carvão vegetal na alimentação das galinhas também contribui para uma avicultura mais eficiente, melhorando a produtividade das aves e a resistência das cascas dos ovos. Segundo Souza, isso se deve a dois fatores. "Em primeiro lugar, sabe-se que a fertilidade é afetada por altos níveis de gordura. Portanto, é natural esperar que aves mais magras coloquem

mais ovos. Em segundo lugar, o carvão vegetal é muito rico em cálcio, o que contribui para tornar a casca mais resistente".

Na seção seguinte, são feitas considerações sobre a matéria-prima e os processos de obtenção do Carvão Vegetal.

3 MATÉRIA-PRIMA, CONSTITUIÇÃO E PROCESSO DE OBTENÇÃO DO CARVÃO VEGETAL

A principal matéria-prima para a fabricação do carvão vegetal é a madeira (lenha). Esta pode ser dividida em dois grupos principais: madeira nativa (provém do desmatamento das florestas, sendo suas espécies variadas de acordo com a região) e madeira de reflorestamento (oriunda do plantio de espécies para esse fim. O eucalipto é o mais utilizado por causa das suas propriedades químicas, físicas e econômicas).

Quimicamente, a madeira é mais bem definida como um biopolímero tridimensional, formado por celulose, hemicelulose e lignina e uma menor quantidade de extrativos e materiais orgânicos. A substância química mais abundante numa árvore viva é a água, mas, na madeira em base seca, toda a parede celular da madeira é formada por polímeros de açúcares (carboidratos, 65 a 75%), que são combinados com a lignina (18 a 35%) (ROWELL *et al*, 2005).

Em base seca, a madeira é constituída de 88% a 99,9% de componentes orgânicos, às vezes denominados carbono fixo e volátil. Celulose, hemicelulose e lignina formam essa parte orgânica, distribuída em 20 a 28% de lignina, 42 a 45% de celulose e 27 a 30% de hemicelulose (SALAZAR e CONNOR, 1983).

A lignina funciona como um ligante plástico entre os constituintes da biomassa. É facilmente destruída por ácidos. Tem uma massa molecular em torno de 1000 g/gmol, e sua composição é $C_{47}H_{52}O_{16}$, ou $C_{42}H_{32}O_6 (OH)_5 (CH_3O)_5$. É removida da madeira durante o processo de fabricação da polpa de celulose e usada na indústria química como estabilizante de asfalto, dispersantes, aditivos em óleos, na fabricação da baunilha e outros (THE CONDENSED CHEMICAL DICTIONARY, 1971).

Portanto, a madeira é um material bastante heterogêneo, cuja proporção aproximada de celulose, hemicelulose e lignina é, respectivamente, 50:20:30. Os demais compostos da madeira, presentes em menor quantidade, são compostos de baixo peso molecular e são chamados de

extrativos, sendo encontrados principalmente na casca, geralmente formados por terpenos, óleos essenciais, resinas, fenóis, taninos, graxas e corantes (PHILIPP, 1988).

A madeira quando submetida a temperaturas elevadas, passa por um processo que transforma os seus componentes. Esse processo de transformação da madeira pelo calor pode ocorrer de diferentes maneiras; a mais conhecida e importante é a Pirólise.

A Pirólise é o processo físico-químico no qual ocorre uma ruptura da estrutura molecular original de um determinado composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio, ou seja, é um processo de decomposição química por calor em uma atmosfera não oxidante. Seu balanço energético é positivo, ou seja, produz mais energia do que consome. O resultado do processo é a formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso). As proporções desses compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado (BEENACKERS e BRIDGWATER, 1989).

O processo de Pirólise, que alguns autores também chamam de processo de carbonização, consiste em um conjunto de complexas reações químicas acompanhadas de processos de transferência de calor e massa. A composição heterogênea das frações produzidas e as possíveis interações entre si tornam ainda mais complexo o processo. Essas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa: a hemicelulose, celulose e lignina (PINHEIRO *et al.*, 2001). A lignina contribui para a formação de cerca de 50% do carbono fixo na fração sólida. Portanto, materiais com alto teor de lignina são mais apropriados para a obtenção de alta concentração de carbono fixo na fração sólida (ANTAL JR. *et al.*, 1991).

O processo de pirólise também pode ser considerado como um dos processos de destinação final de resíduos sólidos mais eficientes que já foi descoberto pelo homem; porém face ao processo ser ainda custoso no que tange à sua manutenção, necessita de maior aprimoramento tecnológico. Esse sistema é bastante utilizado pela indústria petroquímica e na fabricação de fibra de carbono.

O tipo de biomassa e os parâmetros do processo têm influência decisiva no tipo de produto resultante e nas proporções das frações sólidas, líquidas e gasosas obtidas. Os principais parâmetros que têm influência direta nos resultados do processo são: Temperatura; Tempo de Residência; Taxa de Aquecimento; Pressão; Tipo de Atmosfera e o uso ou não de catalisadores (MARCOS, 1989).

A influência da temperatura de carbonização nas propriedades química e física do carvão vegetal pode ser observada no Quadro 1.

| Temperatura Carbonização (°C) | Densidade aparente relativa (t/m ³) | Nº Poros – diâmetro médio (µm) | % Finos < 13 mm (Teste de tamboramento) | Resistência à ruptura, (kgf/cm ²) | Aumento da reatividade em relação a 300 °C |
|-------------------------------|---|--------------------------------|---|---|--|
| 300 | 0,39 ± 0,80 | 442 – 86,3 | 13,2 | 28,6 ± 2,3 | - |
| 500 | 0,35 ± 0,03 | 564 – 71,2 | 14,6 | 20,9 ± 2,4 | 14% |
| 700 | 0,39 ± 0,05 | 430 – 73,6 | 12,9 | 34,3 ± 5,9 | 19% |

Quadro 1 - Propriedades do Carvão Vegetal Relacionadas com a Temperatura de Carbonização
Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

A pirólise pode ser também realizada utilizando briquetes resultantes de processos de compactação de resíduos vegetais (subprodutos derivados de processos agroindustriais, indústria madeireira e culturas agrícolas). Com a pirólise, esses briquetes adquirem maiores teores de carbono e poder calorífico, podendo ser utilizados com maior eficiência na produção de energia e também como redutores siderúrgicos, com a vantagem de possuírem formato geométrico definido e alta resistência mecânica.

Se houver uma quantidade de oxigênio suficiente para transformar toda a madeira em vapor e gases, restarão como resíduos os óxidos minerais ou cinzas (ex: fogueira ao ar livre, com queima total da madeira).

O processo de carbonização consiste, então, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto. A relação teor de carbono no carvão vegetal/ teor de carbono na lenha é de aproximadamente 1,7 (BRAGA, 1992).

4 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO CARVÃO VEGETAL

As características da matéria-prima (madeira) e a técnica utilizada para carbonizar influenciam diretamente nas propriedades do carvão vegetal. Quanto maior a umidade da madeira, mais quebradiço e friável³ será o carvão resultante, pois, durante o processo de

³ A friabilidade é a propriedade que o carvão vegetal possui de gerar finos, quando sujeito a esforços resultantes de abrasão e queda durante manuseio e transporte.

carbonização, a água passa do estado líquido para o gasoso, gerando pressão interna com o vapor, ocasionando o fendilhamento do carvão. A idade, a espécie e o clima determinam a densidade da madeira, que irá determinar a densidade do carvão e, conseqüentemente, a concentração de carbono fixo. Outros fatores importantes para determinadas características do carvão são o processo de combustão, a temperatura e a pressão utilizadas.

Pela análise química imediata do carbono vegetal, determina-se o teor de: umidade, matérias voláteis, carbono fixo e cinzas, que são importantes nos balanços de massa nos processos que utilizam o redutor (OLIVEIRA *et al.*, 1982).

Outras propriedades importantes relacionadas ao uso do carvão vegetal são porosidade, densidade aparente, reatividade, granulometria, resistência mecânica.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal é uma das características mais importantes no procedimento de qualificação, uma vez que está diretamente correlacionado com o poder calorífico desse combustível (BATAUS *et al.*, 1989).

4.1 CARBONO FIXO

O carbono fixo depende da carbonização da madeira e do teor de lignina na madeira (BRITO, 1993). Quanto maior a quantidade de carbono fixo, maior será o índice de combustão da partícula na ICP. A taxa de substituição será maior com o aumento do carbono fixo na partícula.

Segundo Mendes *et al.* (1982), a temperatura final de carbonização é o principal parâmetro que influencia os teores de carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal. Isso pode ser observado no Quadro 2, no qual é possível ver que, quando a temperatura de carbonização se situa em torno de 700 °C, obtém-se a melhor concentração de carbono fixo.

| Material | Temperatura de carbonização (°C) | Análise química Imediata base seca (%) | | | H ₂ O Do Carvão (%) | Rendimento Em carvão, base seca (%) | Rendimento em carvão, base úmida (%) | Rendimento em carbono fixo (%)* |
|-----------------------------|----------------------------------|--|--------------------|--------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| | | Carbono fixo | Materiais voláteis | Cinzas | | | | |
| Eucaliptus Grandis 5,5 anos | 450 | 75,06 | 21,03 | 3,91 | 4,17 | 32,89 | 28,2 | 23,66 |
| | 550 | 86,53 | 10,12 | 3,33 | 2,97 | 28,15 | 24,2 | 23,63 |
| | 700 | 89,82 | 7,20 | 2,93 | 2,41 | 27,57 | 23,0 | 24,17 |

Quadro 2 - Análise Química Imediata do Carvão Vegetal e Rendimento em Carbono Fixo

Fonte: CETEC

4.2 MATERIAIS VOLÁTEIS

São substâncias formadas pelos elementos químicos carbono, hidrogênio e oxigênio. Sua quantidade é influenciada pela lignina, estrutura da madeira e carbonização (BRITO, 1993; BRAGA, 1992). Um aumento de materiais voláteis acarreta abaixamento no percentual de carbono fixo. A reatividade é influenciada diretamente na quantidade de material volátil do carvão vegetal. Para o carvão vegetal, um aumento no carbono fixo acarretará um aumento da reatividade no processo de combustão.

4.3 REATIVIDADE FRENTE AO CO₂

É a característica que um combustível sólido tem de reagir com o dióxido de carbono a uma determinada temperatura de acordo com a reação:



A reatividade é o fator determinante da característica do carvão vegetal como redutor. Maior reatividade implica maior cinética da combustão e maior geração de gás redutor da carga metálica (CO) (MORAIS 2005). Isso é importante para os processos de Injeção de Carvão Pulverizado - ICP (que seria relacionada à oxidação do carbono pelo oxigênio), pois o tempo de permanência da partícula de carvão vegetal na zona de combustão é extremamente pequeno, cerca de 20ms.

4.4 UMIDADE

O carvão vegetal é altamente higroscópico (propriedade que certos materiais têm de absorver água). A água é extremamente prejudicial à operação no alto-forno e, no caso da ICP, provoca perda de calor, aumentando o consumo específico de carbono e diminuindo a resistência do carvão vegetal (MORAIS, 2005) e, particularmente, para os sistemas de injeção, induz a entupimento dos vasos de transporte de carvão pulverizado para as ventaneiras.

A umidade contida no carvão vegetal exerce uma grande influência no rendimento dos processos em que ele é utilizado.

Outra consequência da absorção de umidade pelo carvão vegetal está na sua resistência mecânica. Como o carvão vegetal é submetido, no alto-forno, a um aquecimento durante sua descida, atingindo a zona de reserva térmica em torno de 800-850° C, o teor de umidade deve ter uma ação bastante importante na marcha do aparelho de redução (CETEC, 1981).

4.5 RESISTÊNCIA MECÂNICA

Essa propriedade se difere quando se compara a sua utilização em alto-forno e ICP. No caso da ICP, seria importante o carvão ter baixa resistência mecânica, ao contrário do que ocorre para o carvão vegetal enornado pelo topo do alto-forno. Isso porque a granulometria trabalhada para injeção normalmente é de 80 % < 200mesh (ou 0,074µm), então, é preciso que a moinha (carvão fino) passe por um processo de cominuição⁴ antes da sua injeção no alto-forno. Nesse caso, seria importante a baixa resistência mecânica para um melhor rendimento de moagem. Existe um parâmetro que indica essa resistência mecânica, que é o HGI (Hardgrove Grindability Index)⁵. Quanto maior o HGI, mais macio é o carvão, portanto maior será a produtividade do moinho.

No uso residencial e comercial, a exigência quanto à resistência é bem diversa, uma vez que se deseja que ocorram mínimas perdas durante o transporte.

4.6 GRANULOMETRIA

Granulometria está relacionada ao tamanho da partícula, sendo importante para o alto-forno (MORAIS, 2005) e a ICP. A matéria-prima (moinha) deve ter a menor granulometria possível, no caso da ICP. Ou seja, granulometria menor implica menor tempo de moagem, menor desgaste do moinho (consequentemente, menor manutenção) e maior rendimento de moagem, isso para um carvão vegetal de mesmo HGI.

⁴ Cominuição é o ato ou efeito de cominuir e tem o significado semelhante a fragmentação, trituração, pulverização, é uma diminuição gradual pela remoção sucessiva de pequenas partículas.

⁵ O índice de moabilidade do carvão utilizando o ensaio de Hardgrove é normalizado pela NBR 8739.

4.7 POROSIDADE

Porosidade é a medida de espaço vazio (poros) em um material, é uma característica singular do carvão vegetal influenciando na densidade, higroscopicidade⁶ e reatividade. A molhabilidade (ângulo entre a cavidade do poro da partícula e gás) depende da porosidade, ou seja, maior molhabilidade, maior contato sólido e gases, ajudando, assim, a troca de calor entre gases-partícula e a cinética de combustão da partícula (reatividade).

4.8 DENSIDADE APARENTE

É a massa contida de um dado material em uma unidade de volume, é expressa em kg de carvão/m³ ou kg de carbono/m³. Fator importante para o alto-forno, influenciando diretamente no volume disponível do alto-forno para a carga metálica implicando, assim, produtividade (MORAIS, 2005).

A massa de 1,0 m³ de carvão vegetal é chamada densidade do granel, dada por kg/m³, denominada pela ISO de *bulk density*. Normalmente, esse valor gira em torno de 300kg/m³ para o carvão vegetal. Se, a partir dessa medida de volume, diminuir-se o volume dos vazios existentes entre os vários pedaços de carvão, sem considerar que os poros internos estão ocupados por ar, ter-se-á a chamada densidade aparente. A densidade verdadeira é a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, ou seja, é a densidade aparente descontando-se o volume da porosidade interna. Desse modo, relacionando-se a densidade verdadeira com a aparente, ter-se-á a medida da porosidade do carvão (PENEDO, 1980).

4.9 CINZAS

Quanto ao teor de cinzas, um dos aspectos mais importantes está relacionado com sua composição. Os componentes das cinzas são P, SiO₂, Al₂O₃, S, CaO, MgO, K₂O e Na₂O. A composição química das cinzas varia de árvore para árvore e de galho para tronco. Elevado teor de cinzas é prejudicial tanto no alto-forno quanto na ICP. Nos dois casos, as cinzas consomem calor e ocupam volume dentro da partícula e do alto-forno. Normalmente, quanto maior o teor de cinzas,

⁶ Higroscopicidade é a propriedade que certos materiais possuem de atrair umidade da atmosfera envolvente e de a manter na forma líquida ou vapor de água.

menor será o índice de combustão e a taxa de substituição, quando se pratica a ICP (JUVILLAR, 1979; BRITO, 1993).

Para que sejam determinadas as propriedades físico-químicas do carvão vegetal, existem normas que regulamentam os testes, com a finalidade de padronização dos procedimentos para que os resultados não distorçam acentuadamente em função deles.

4.10 NORMATIZAÇÃO

Para se determinar umidade, materiais voláteis, carbono fixo, cinzas e demais propriedades físico-químicas do carvão vegetal, são utilizadas normas técnicas regulamentadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e de outras instituições internacionais de renome:

NBR 6922 – Determinação da Massa Específica (Densidade a Granel) prescreve o método de determinação da massa específica do carvão vegetal como recebido.

NBR 6923 – Carvão Vegetal - Amostragem e Preparação da Amostra, que define os procedimentos de coleta e preparação de amostras para realização de ensaios de caracterização de carvão vegetal.

NBR 7402 – Carvão Vegetal – Determinação Granulométrica.

NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análises Imediatas, destinadas à determinação dos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo de carvão vegetal.

NBR 8293 – Carvão Vegetal – Determinação da umidade.

NBR 8633 – Determinação do Poder Calorífico, prescreve o método de determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática.

NBR 8740 - Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão.

A partir dos resultados dos ensaios, pode ser calculado o poder calorífico inferior – PCI - e a densidade energética das biomassas para comparação do seu desempenho como combustível. Entendendo-se por densidade energética a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível, pode ser obtida pelo produto do PCI com a densidade a granel das amostras.

Existe também a normatização americana para a determinação de algumas propriedades físico-químicas do carvão vegetal, regulamentada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e semelhantes a algumas normas da ABNT.

ASTM – D-1762-64 – Análises imediatas, destinadas à determinação dos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo de carvão vegetal, semelhante à NBR 8112.

ASTM – D- 240-50 – Determinação do Poder Calorífico, semelhante à NBR 8633.

ASTM – D- 167-73 – Determinação da Massa Específica (Densidade), semelhante à NBR 6922.

ASTM - D-2395-69 - Utilizada para determinação da densidade aparente do carvão vegetal.

5 CONCLUSÕES

O Carvão Vegetal constitui uma importante fonte de energia renovável e suas aplicações evidenciam a importância que exerce na economia formal e informal no Brasil. Existem muitos processos e tecnologias que melhoram a qualidade do Carvão Vegetal e possibilitam a retirada de outros subprodutos durante o processo de carbonização, através da condensação dos gases (principalmente alcatrão e ácido acético) que possuem valor comercial considerável.

Pelo fato de que mais de 80% do carvão vegetal produzido no Brasil é destinado para o setor de siderurgia, é imprescindível que ocorram investimentos em tecnologias e métodos que resultem em maior eficiência econômica e ambiental do processo de carbonização (MUYLAERT *et al.*, 1999) e (HOMMA *et al.*, 2006). Nesse sentido, muitas empresas do setor vêm implementando sistemas de recuperação dos produtos gasosos para a geração de insumos químicos e energéticos. Entretanto, o carvão vegetal na sua maioria é produzido perto das florestas, em fornos de alvenaria, sem recuperação de subprodutos. A utilização desses fornos primitivos implica perdas de 40-50% do poder calorífico.

Em relação à qualidade do carvão para fins siderúrgicos, evidenciou-se a importância da sua densidade, pois essa característica está diretamente relacionada à resistência mecânica do carvão. A densidade relativa aparente relaciona-se com importantes aspectos operacionais e produtivos das usinas siderúrgicas. Além disso, quanto maior for a referida densidade, menores serão os custos de transporte e de armazenamento do carvão e, simultaneamente, melhor será o aproveitamento do volume útil do alto-forno siderúrgico, permitindo aumento da sua produtividade em um determinado espaço de tempo. Madeiras de densidades mais elevadas produzem carvão com maior densidade aparente.

Há trabalhos que demonstram a possibilidade de eliminação completa das emissões de CO₂, CH₄, etileno e outros compostos orgânicos voláteis, melhorando, entre outros aspectos, a qualidade ambiental do ar nos centros de produção (HALOUANI E FARHAT, 2003). Alguns projetos pioneiros vêm preconizando medidas de mitigação das emissões de CH₄ na produção de carvão vegetal, beneficiando-se dos acordos internacionais estabelecidos pelo Protocolo de Kyoto, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

A adoção de sistemas de produção mais eficientes e o reflorestamento com espécies de rápido crescimento, do ponto de vista econômico e ambiental, têm se mostrado viáveis, destacando-se os sistemas agroflorestais (sistemas de uso da terra nos quais espécies lenhosas são cultivadas de forma interativa com cultivos agrícolas, pastagens e/ou animais, visando a múltiplos propósitos, produtos e serviços). Tais sistemas, se desenhados e manejados adequadamente, podem ser lucrativos e potencialmente sustentáveis.

Por fim, uma política florestal adequada ampliaria a área florestada no Brasil, desenvolveria o manejo florestal e promoveria a exploração de acordo com estratégias ecológicas preestabelecidas. Isso, associado às técnicas de recuperação de subprodutos reduziria consideravelmente a emissão de poluentes na atmosfera e valorizaria a madeira como matéria-prima para geração de energia.

REFERÊNCIAS

- ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard methods of testing small clear specimens of timber. **Annual book of ASTM Standards**. Denver: (s.n.), D143/94, p. 23-53, 1997.
- ANTAL JR., M. J et al. A new technology for manufacturing charcoal from biomass. **Energy From Biomass & Wastes**, XV Conference, Washington, D. C., mar. 1991.
- BATAUS, Y. S. de L. et al. **Carbonização integral de frutos de palmáceas**. Brasília: IBAMA, LPF, 1989. (Série Técnica, 2).
- BEENACKERS, A. A. C. M.; BRIDGWATER, A. V. Gasification and pyrolysis of biomass in Europe. In: **Pyrolysis and gasification**, Londres: Elsevier Applied Sciences, v. 1, p. 129-155, 1989.
- BELLOTE, A. F. Brasil deve Investir mais em Florestas Comerciais. In: SIMPÓSIO BRASIL-FRANÇA DE ENERGIA: novos atores, novas relações geopolíticas e o papel da agroenergia. São Paulo. Disponível em: <<http://www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php?id=32241>>. Acesso em: 21 set. 2009.

BRAGA, R. N. B. et al. Carvão Vegetal, Produção, Propriedades e Aplicações na Siderurgia. Livro publicado pela ABM, **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**, 1992, p. 320.

BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE. S. A. A review of biomass pyrolysis and pyrolysis technologies. In: **Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization**. Londres: Elsevier Applied Science, v.1, p. 11-93. 1991

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização do carvão vegetal de madeira. Piracicaba: ESALQ, 1990. p. 19. (Documentos Florestais, 9).

_____. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF**, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais, Circular técnica N° 181, p. 6, out. 1993.

_____. Os Principais Desafios da Prática de Produção de Carvão Vegetal no Brasil. **Painel Florestal**. Disponível em: <<http://painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1360>>. Acesso em: 21 set. 2009.

CETEC, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, v. 1, 1981.

_____. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, v. 1, 1982.

ESULC, Espaço Universalista Luz da Consciência. **Usando o Carvão Vegetal**. Disponível em: <http://www.esulc.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=18:usando-o-carvao-vegetal&catid=7:artigos&Itemid=9>. Acesso em: 22 set. 2009.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global forest resources assessment 2005**. FAO, Rome 2006.

FERREIRA, O. C. Carbon Content In Biomass Fuel. **Economy and Energy**, aug./ sept. 2006.

FREITAS, Eduardo. Carvão Vegetal. **Brasil Escola**. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/geografia/carvao-vegetal.htm>>. Acesso em: 22 set. 2009.

GOMIDE, R. **Estequiometria Industrial**. 2. ed. São Paulo, 1979. p. 413.

HALOUANI, K; FARHAT, H. Depollution of atmospheric emissions of wood pyrolysis fumaces. **Renewable Energy**, v. 28, p. 1289-138, 2003.

HOMMA, A. K. O. et al. Guseiras na Amazônia: Perigo para a Floresta. **Ciência Hoje**, v. 39, n. 233, p. 56-59, 2006.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da extração vegetal e silvicultura 2005. **Coordenação de Agropecuária**, Rio de Janeiro, 2006a.

JUVILLAR, J. B. O Carvoejamento da Madeira e seus Reflexos na Qualidade do Carvão: qualidade da Madeira. **IPEF**, Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais, Circular técnica N° 64, p. 6, set. 1979.

- LUENGO, C. A.; CENCIG, M. O. Pirólise ultra-rápida de biomassas para obtenção de insumos químicos e energéticos. In: SEMINÁRIO DE ENERGIA DE BIOMASSA E RESÍDUOS. **Anais...** Belo Horizonte, 1988.
- MARCOS, Martin, F. **El carbón vegetal**. Madri: Mundi-Prensa Castello, 1989.
- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. de. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, p. 74-89, 1982. (Série Técnica, 8).
- MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Fazenda. **Selo em nota para inibir a falsificação**. Disponível em: <http://www.fazenda.mg.gov.br/noticias/selo_carvao.html>. Acesso em: 13 jan. 2007.
- MORAIS, S. A. L., Nascimento, E. A., Melo, D. C. Análise da Madeira de Pinus Carpa Parte 1 – Estudo dos Constituintes Macromoleculares e Extrativos Voláteis. **SIF**, Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005,
- MUYLAERT, M. S.; SALA, J.; FREITAS, M. A. V. The Charcoal's production in Brazil – Process Efficiency and environmental effects. **Renewable Energy**, v. 16, p. 1037-1040, 1999.
- OLIVEIRA, J. B., Gomes; P. A., Almeida, M. R. Carvão vegetal – Destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade, In: Penedo, W.R. **CETEC** - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Publicação técnica, Belo Horizonte, p.173, 1982.
- PATUSCO, J. A. M. et al. Balanço Energético Nacional (BEN). **Ministério de Minas e Energia**, p. 192, 2006.
- PENEDO, W. R. Uso da madeira para fins energéticos. **Fundação CETEC**, Belo Horizonte, 1980.
- PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. O. Celulose e Papel: tecnologia de Fabricação da Pasta Celulósica. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo** – Centro Técnico em celulose e papel. v. 1, 2. ed. São Paulo, 1988.
- PINHEIRO, P. C. et al. **Fundamentos e prática da carbonização de biomassa**. Belo Horizonte: Autores, 2001.
- ROWELL, R. M. et al. Cell Wall Chemistry. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Editado por Roger M. Rowell. New York: Taylor & Francis Group, cap. 3, 2005.
- SALAZAR, C. M.; CONNOR, M. A. Kinetic studies of pyrolysis of wood, with particular reference to eucalyptus regnans. In: **Australian Conference on Chemical Engineering**, 11., 1983, Birsbane, Australia. Proceedings... Sidney: Institute of Engineering Australian, 1984. p.753-761.
- SINDIFER, **Anuário 2007**. Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. Disponível em <http://www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html>. Acesso em: 25 jun. 2009.

SOUZA, P. A. Carvão Reduz Colesterol do Ovo. **Revista Pesquisa** – Fapesp. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=1209&bd=1&pg=1&lg=>>>. Acesso em: 21 set. 2009.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão de Eucalyptus**. 1995. 160 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

XAVIER, A.; BORGES, R. C. G.; CRUZ, C. D.; CECON, P. R. Parâmetros genéticos de características de qualidade da madeira em *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 71-78, 1997.