

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVAVEIS
DIRETORIA DE INCENTIVO À PESQUISA E DIVULGAÇÃO
LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS

LPF - SÉRIE TÉCNICA Nº 13

CARACTERÍSTICAS E ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETES DE CARVÃO VEGETAL

Autores: Waldir Ferreira Quirino**;
José Otávio Brito***

Brasília, 1991

*Trabalho extraído da Dissertação de mestrado apresentada à ESALQ/USP para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais do 1º autor.

** Engenheiro Florestal – M.Sc. - LPF/IBAMA,

** Engenheiro Florestal- Ph.D – ESALQ/USP

Resumo

Este trabalho tem por objetivo analisar as características de briquetes de carvão vegetal de várias procedências (Brasil, Estados Unidos da América e Argentina) e verificar a influência das mesmas sobre seus desempenhos quando submetidos ao processo de combustão. Para avaliar tais desempenhos, preconizou-se um índice denominado “índice de combustão” (ICOM), integrando num só valor o tempo de combustão, a temperatura gerada durante a combustão e a massa consumida para gerá-la. Para a caracterização dos briquetes foram determinados umidade, teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, poder calorífico, densidade, porosidade, friabilidade e resistência à compressão.

Abstract

The purpose of this work was to analyze the physical and chemical characteristics of charcoal briquettes, produced in three countries, and to evaluate their performance during the combustion process. To evaluate the behavior of these briquettes, it was developed a “combustion index”, which correlates the time combustion, temperature generate during the combustion, and used up mass. The physical and chemical characteristics studied were: moisture content, fixed carbon, volatile matter, ashes content, calorific value, apparent, actual and bulk densities, friability, and compression strength.

KEY WORDS: compactation, biomass, and wood energy.

INTRODUÇÃO

Em um país com as características de crescimento demográfico e desenvolvimento industrial do Brasil, onde os investimentos para produção de energia não acompanharam a evolução da demanda, a discussão sobre opções de geração adicional de energia reveste-se de singular importância. Do mesmo modo, devido à dimensão e às grandes distâncias internas do país, o aspecto “concentração de energia”, visando viabilizar o seu transporte, torna-se relevante.

A briquetagem é uma forma muito eficiente para concentrar a energia disponível na biomassa. Exemplifica-se este fato na consideração de que 1,00m³ de briquetes contém pelo menos 5 vezes mais energia que 1,00m³ de resíduos, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio destes materiais.

O carvoejamento de resíduos na produção de carvão particulado fino, para posterior briquetagem, seria um ótimo processo para ampliar a oferta de carvão vegetal, com a vantagem adicional de reduzir a pressão de exploração sobre as florestas remanescentes. No entanto, o carvoejamento industrial destes resíduos, na prática, inexistente no Brasil, principalmente de forma contínua, como é tradicional em outros países, que produzem, de longa data, os briquetes de carvão vegetal.

Acredita-se que o briquete de finos de carvão vegetal possa vir a representar uma opção real para geração de energia no Brasil. Com isso, poderia ser aumentado de modo significativo o papel da biomassa como fonte energética, que, em nosso país, é reconhecida como potencialmente bastante expressiva.

Há, entretanto, uma série de questões a serem estudadas para a efetiva implementação da prática de produção e do uso de briquetes de carvão vegetal no Brasil. Tais questões teriam essencialmente que abordar os aspectos relacionados ao perfeito

conhecimento de suas propriedades e características. Isto permitiria melhor orientação para o mercado, tanto para consumidores quanto para produtores, que poderiam dispor de normas de qualidade e diferentes classes de produtos. Os briquetes não seriam analisados referencialmente ao carvão vegetal, e constituiriam-se em um energético sólido com características próprias, como em verdade o são. Possuem o pó de carvão vegetal como matéria-prima básica, podendo, no entanto, contar com outros componentes.

Diante do exposto, tem-se como objetivo geral deste trabalho a realização de um estudo de caracterização de briquetes de carvão vegetal, principalmente quanto ao seu comportamento durante a combustão. Para isso foi necessário elaborar um índice de combustão que representasse o desempenho qualitativo do briquete na geração de calor e que permitisse a comparação de diferentes procedências do material. Finalmente, procurou-se analisar a correlação deste índice com as principais características físicas e químicas dos briquetes. Neste estudo foram utilizados briquetes produzidos no Brasil, Estados Unidos da América e Argentina, comercializados como combustível para uso doméstico.

REVISÃO DE LITERATURA

A consolidação de material particulado foi tão importante para a engenharia como o processo inverso, ou seja, a com diminuição ou redução do tamanho. Entretanto, o primeiro processo não recebeu a mesma atenção, porque os conhecimentos e as experiências desenvolvidas ficaram dispersas em várias áreas ou seguimentos de atividades industriais.

A briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. No caso do carvão vegetal, usa-se, geralmente, um ligante, que pode ser de várias naturezas, porque esta é a maneira mais econômica de compactá-lo. O processo exige bons conhecimentos sobre as forças coesivas entre os sólidos, adesividade do ligante, comportamento reológico do conjunto partícula-ligante e, fundamentalmente, propriedades físicas das partículas, química de superfície e mudanças físicas e químicas durante o processo de aquecimento (SALEME, 26).

Ainda segundo esse autor, tanto a porosidade como a solidez e a resistência de um carvão vegetal dependem das condições sob as quais foi feita a carbonização. Isto justifica o estudo das conseqüentes modificações que podem ocorrer em briquetes submetidos a tratamentos térmicos durante ou após a secagem. Também é de importância fundamental o estudo do poder adsorvente e absorvente das partículas do carvão vegetal, ou seja, a química de superfície, juntamente com o estudo da estrutura do pó do carvão, que permitirá determinar a relação pasta ligante/esqueleto granular, visando regular a mistura exata, possibilitando controlar o fenômeno de "creep", que acontece a determinadas temperaturas do tratamento térmico e, também, evitar o trincamento do briquete na ocasião da desmoldagem.

MESSMAN & TIBBETTS (19) afirmam que os aglomerantes são materiais essenciais para auxiliar a briquetagem econômica. Teoricamente, alguns materiais sólidos podem ser compactados sem aglutinantes se altas pressões são aplicadas. Segundo SALEME (26), o ligante deve comportar-se como um simples adesivo que ligue duas superfícies inertes, formando uma amálgama com o carvão, amolecendo e produzindo a soldagem, das partículas. PIETSCH (23) afirma que os aglutinantes podem ser de três tipos: tipo matriz, tipo filme e químico.

Aglutinantes do tipo "matriz" envolvem completamente as partículas formando

uma matriz contínua. São requeridas quantidades razoáveis do aglutinante porque, de modo geral, estas substâncias apresentam baixa resistência, que depende de uma fase contínua em volta das partículas individuais. Exemplos desses aglutinantes são: alcatrão mineral, alcatrão de madeira, asfalto ou piche de petróleo.

Aglutinantes tipo “filme” são geralmente usados como soluções ou dispersões. A água é o solvente mais comum, usando-se também o álcool, a acetona, o tetracloreto de carbono, além de outros solventes. Os briquetes "verdes" ou úmidos tem baixa resistência, e quando secos apresentam alta resistência. A água pode ser considerada um caso especial de filme. Ela dissolve cristais ou partículas e quando seca provoca recristalização cruzada. Isto pode favorecer a coalescência pela tensão superficial entre materiais insolúveis. No caso de materiais orgânicos ou produtos celulares, a água estimula a adesão pelas forças de Van der Waals, pelo aumento da área verdadeira de contato entre partículas. Alguns exemplos desses aglutinantes são: o silicato de sódio, a água, o amido, o melão, os lignosulfatos, e outros.

Os aglutinantes químicos são aqueles em que o efeito de adesão depende de reações químicas efetivas dos componentes do aglomerado entre si, ou entre o aglomerante e o material que está sendo aglomerado. Aglutinantes químicos podem também ser do tipo matriz ou filme, dependendo, principalmente, da resistência e das características dos produtos das reações. Como exemplos temos Ca(OH)_2 + melão, $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2$ $\text{MgO} + \text{Fe}_3\text{O}_4$, silicato de sódio + CO_2 e outros.

Diferentes tipos de aglomerantes podem ser usados conjuntamente, obtendo-se resultados adicionais desejados.

PIETSCH (23) identifica substâncias que são adicionadas ao material a ser aglomerado para diminuir o atrito entre partículas ou entre equipamento e material, denominados lubrificantes. Um dos lubrificantes mais comuns é a própria água. No caso de altas pressões, podem ser usados lubrificantes sólidos, como a grafite.

Segundo MESSMAN & TIBBETTS (19), um exemplo de adição de substâncias para alterar o processo de aglomeração é a inclusão de bórax de 2 - 3% do peso do amido seco em briquetes de carvão vegetal, que melhora de modo marcante o produto, principalmente quando o carvão mineral, ou antracita, é incorporado como densificador. Segundo esses mesmos autores, os aglutinantes podem também ser divididos em orgânicos e inorgânicos. Geralmente onde se aplicam os inorgânicos tende-se a obter produtos menos caros. Um dos aglutinantes orgânicos mais baratos é o licor negro oriundo da indústria do papel.

BRITO (5,6), produzindo briquetes experimentais de carvão de casca de pinus, constatou que a granulometria do carvão e a força de prensagem influenciam significativamente na densidade relativa aparente e também na resistência ao esmagamento. No trabalho verificou-se que ao se comparar diferentes briquetes, o maior teor de cinzas não prejudica necessariamente o comportamento do briquete na combustão, e que, aditivos e enchimentos poderiam ser agregados ao pós de carvão, aumentando a densidade e melhorando outras características físico-mecânicas do briquete.

Várias empresas siderúrgicas de Minas Gerais pesquisaram a briquetagem como uma das opções de aproveitamento do expressivo volume de finos gerados no peneiramento do carvão vegetal, quando da seleção de granulometria, antes do carregamento do alto-forno. Segundo SILVEIRA & CAMPOS (28), essa quantidade pode variar em função da qualidade do carvão e da exigência de granulometria mínima característica de cada tipo de equipamento de redução. Esses pesquisadores mostraram sua preocupação na utilização dos

finos discutiram uma série de alternativas, das quais a única que vinha sendo aplicada, na época, era a sinterização de minério de ferro. Uma das opções mencionadas seria a da compactação, usando o briquete como redutor. Ressaltaram que a uniformidade granulométrica do briquete permitiria a distribuição mais uniforme, do fluxo gasoso por meio da carga, e a maior densidade do briquete conduziria a um menor consumo específico de carbono. O briquete deveria ter, entretanto, uma resistência, quando aquecido e sobre pressão, equivalente as condições de reação de processo no alto-forno.

A briquetagem de carvão de babaçu visa a obtenção de resistência quente compatível com o uso do briquete em cubiôlos e alto-forno de pequeno porte. Como aglomerantes foram utilizados dextrina de milho, piche com baixo ponto de amolecimento, melaço e emulsão asfáltica. Essas experiências permitiram concluir, segundo ASSI et alii (2), que é possível obter o briquete do carvão de babaçu com boa resistência a frio e a quente, desde que se use o piche de carvão mineral associado 5 dextrina de milho como aglutinante. Com esses briquetes pode-se substituir o coque em cubiôlos de 600mm de diâmetro, aumentando-se, no entanto, o consumo de combustível e diminuindo-se a produção.

Posteriormente, pesquisou-se a possibilidade do emprego dos finos de carvão vegetal em misturas a coqueificar, utilizando o processo mistura-briquete, técnica que amplia as faixas de carvões minerais usados na fabricação de coque de alto-forno, pela adição de briquetes de carvão vegetal na coqueificação. Segundo ULHOA et alii (29), esse processo, desenvolvido e industrializado no Japão, pode ser empregado com sucesso quando se deseja aumentar a resistência do coque sem mudança dos carvões componentes da mistura a coqueificar. Adicionam-se briquetes de carvão vegetal aos carvões minerais com baixo poder de coqueificação ou não-coqueificantes, conseguindo-se melhoria na qualidade final do coque.

BROSCH & FURUNO (7) testaram a briquetagem de finos de carvão mineral adicionados a finos de carvão vegetal, utilizando como aglutinante o melaço. Concluíram que a proporção de 40% de carvão vegetal para 60% de carvão mineral era satisfatória. Esse trabalho, no entanto, pretendia estudar as técnicas experimentais para desenvolvimento de testes futuros. Esses autores concluíram também que a separação hidrogravimétrica permite apreciável enriquecimento da moinha em carbono, reduzindo a porcentagem de cinzas.

Um dos poucos trabalhos brasileiros que aborda a qualidade de briquetes para uso doméstico é de GOMES (11), que comparou o comportamento de três briquetes com o carvão vegetal granulado. Os resultados obtidos não permitem conclusões sobre o comportamento qualitativo dos briquetes, mas apenas a referida comparação entre carvão e briquete.

A qualidade dos briquetes, segundo KOMAREK RESEARCH (14), é avaliada por meio de algumas de suas propriedades peculiares, ou baseado, em algumas de suas características de comportamento durante o uso, como, por exemplo, a capacidade de acendimento, que avalia a facilidade de ignição dos briquetes (norma ASTM 2677).

QUIRINO et alii (24) sugeriram uma adaptação dessa norma, afirmando ser a ignição uma das propriedades que representa um item de conforto na utilização doméstica do briquete, justificando que a norma americana restringe-se a briquetes em forma de almofada.

A KOMAREK RESEARCH (14) ressalta também que os briquetes podem ser avaliados quanto a sua resistência a absorção de umidade, a soluções salinas, podendo

também ser quantificada a reatividade dos mesmos. Entretanto, testes que avaliam as propriedades mecânicas são usualmente os mais empregados. A resistência à compressão determina a capacidade de empilhamento na estocagem. O teste de tamboramento, ou índice de quebra e abrasão, determina a resistência à abrasão provocada durante o transporte e manuseio natural dos briquetes. Todos estes testes medem certos aspectos de qualidade dos briquetes. No entanto, estes resultados devem ser interpretados com cuidado, porque são influenciados pelo tamanho e forma dos briquetes, e ainda pelas propriedades dos materiais a partir dos quais são produzidos. Para muitos propósitos, a densidade é o parâmetro de qualidade mais importante.

Como se nota é relativamente pouca a atenção dada pela pesquisa a qualidade do briquete para uso doméstico. A maioria dos trabalhos citados refere-se a briquetes para uso industrial. A KOMAREK RESEARCH (14) alega que a preocupação de qualidade do briquete é primordialmente do produtor, o que vem justificar a pequena quantidade de trabalhos americanos sobre o assunto.

No Brasil, o interesse da briquetagem sempre esteve voltado para o aproveitamento dos finos de carvão vegetal oriundos da siderurgia, levando a maioria das pesquisas para o desenvolvimento de briquetes para usos nessa atividade.

A atividade industrial e comercial do briquete doméstico no Brasil está sendo iniciada por pequenas empresas, sem capacidade para investimentos em pesquisas, justificando-se, possivelmente aí, a baixa e a grande variedade de qualidade dos briquetes. Este trabalho apresenta argumentos teóricos e práticos que possibilitam melhorar o controle de qualidade desses produtos.

MATERIAL E MÉTODO

Foram analisadas quatro procedências de briquetes produzidos no Brasil, três de procedências dos Estados Unidos da América e duas da Argentina. Como todas se referem a produtos comerciais, neste trabalho elas são identificadas apenas pelo país de origem acompanhado de um número. Com isso procurou-se evitar a promoção positiva ou negativa de marcas comerciais. Todos os briquetes brasileiros encontravam-se nas suas embalagens para comércio varejista, com exceção do BR3, adquirido diretamente na indústria produtora. Os briquetes americanos e argentinos também estavam em suas embalagens originais de comércio varejista.

A prioridade que se deu para trabalhar com briquetes adquiridos no comércio varejista teve o objetivo de garantir a aleatoriedade da amostragem.

Efetuar-se análises imediatas, com as determinações de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, mediante a metodologia expressa na norma ABNT NBR 8112, sendo cinco repetições por procedência de briquete. A densidade relativa aparente foi obtida utilizando-se o método da balança hidrostática, usualmente empregada para madeiras, proposta pela Associação Brasileira de Celulose e Papel (M14-74). Obteve-se a densidade verdadeira pelo método do picnômetro, citado por OLIVEIRA et alii (1982), e a porosidade foi obtida pela fórmula:

$$P=(1-DA/DV \times 100)$$

onde: P = porosidade em porcentagem

DA = densidade relativa aparente

DV = densidade relativa verdadeira

Para tais parâmetros também foram realizadas cinco repetições por procedência de briquete.

Determinou-se o poder calorífico superior em calorímetro isotérmico por meio da metodologia estabelecida na norma ABNT NBR 8633. Realizaram-se 10 repetições para cada procedência de briquete.

Para determinação da densidade a granel utilizou-se a metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 6922, para carvão vegetal. Em função da quantidade limitada de briquetes e da homogeneidade granulométrica dos mesmos, promoveu-se uma adaptação da norma reduzindo-se as dimensões da caixa de 600 x 600 x 600mm para 300 x 300 x 300mm. Efetuaram-se cinco repeniques para cada procedência de briquete.

Para avaliar a friabilidade dos briquetes ou índice de quebra e abrasão, utilizou-se uma proposta de teste de laboratório sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais, para carvão vegetal, citado por OLIVEIRA et alii (22). Devido à natureza do material testado, foram feitas algumas modificações. Utilizou-se para cada repetição, aproximadamente, 500g de briquetes em sua granulometria original, executando-se cinco repetições para cada procedência. A velocidade de rotação do tambor usado no teste foi de 35rpm, por um tempo de 15 minutos. Mediram-se os finos gerados abaixo de 15mm, apresentando-os em porcentagem.

Finalmente efetuou-se teste de carga para avaliar a resistência à compressão em máquina universal de testes Instron, com velocidade de carregamento de 0,03cm/min. A carga foi aplicada na menor dimensão dos briquetes que possuíam forma almofadada e no sentido diametral nos briquetes de formato cilíndrico. Observou-se experimentalmente ser esta a posição de menor resistência ao esmagamento nos briquetes cilíndricos e a de acomodação natural nos briquetes de forma almofadada.

Com a finalidade de avaliar o desempenho dos briquetes durante a combustão, elaborou-se um dispositivo de teste, ilustrado nas Figuras 1, 2, e 3.

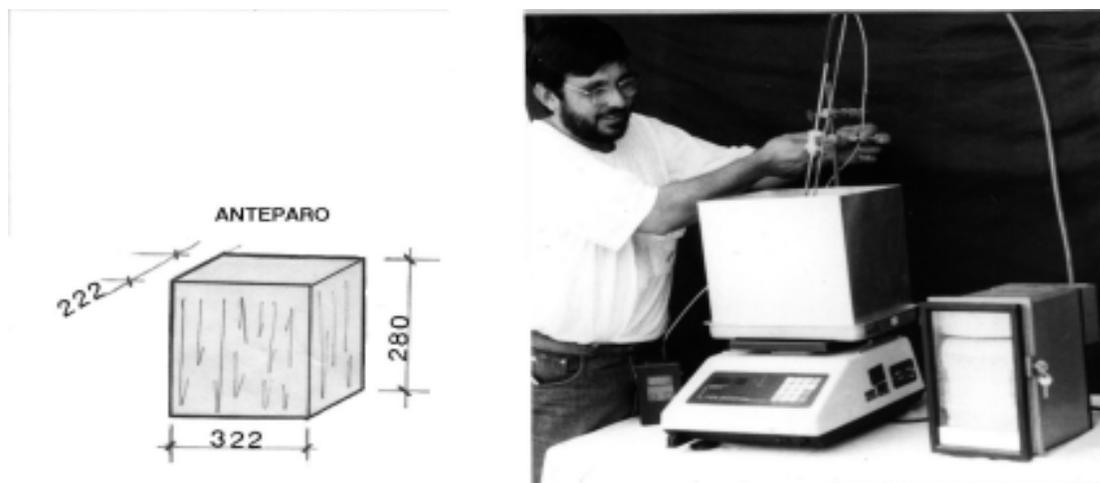


Figura 1 – Conjunto de teste mostrando balança, combustor, registrador de temperatura e termômetro digital e, ainda, esquema com as dimensões em milímetros do anteparo do combustor.

O conjunto de teste é formado pelo combustor, montado sobre duas bandejas de alumínio invertidas uma sobre a outra, sendo o espaço entre as duas, preenchido com lã de vidro. Um anteparo de chapa de alumínio protege a combustão da movimentação do ar. As bandejas protegem a balança do calor da combustão. Fazem parte do conjunto de teste um termômetro digital e um registrador de temperatura com seus respectivos termopares e cabos de compensação. A balança empregada tem capacidade de 2,5kg e precisão de 0,5g.

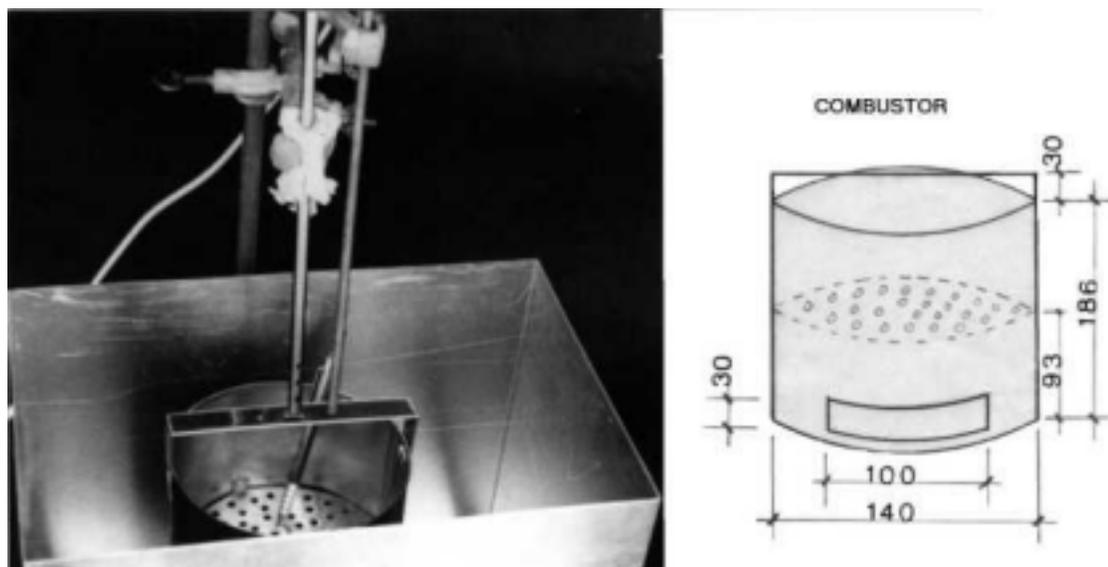


Figura 2 – Detalhe do combustor, vendo-se grelha, gabarito fixador da altura dos termopares e esquema com dimensões do combustor em milímetros.

Este aparelho possibilita a verificação da temperatura e da massa que está sendo consumida a cada instante durante a combustão. Isto permite elaborar curvas de temperatura x tempo, massa x tempo e massa x temperatura. A partir de valores obtidos em pontos característicos destas curvas, é possível elaborar um índice denominado neste trabalho de "índice de combustão" ou ICOM.

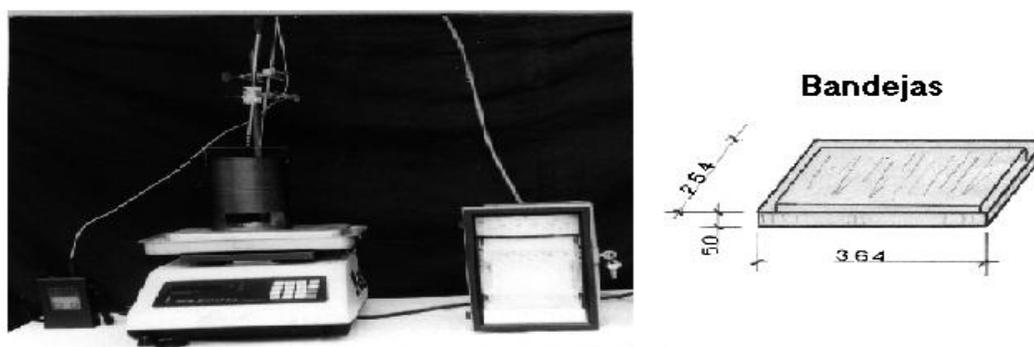


Figura 3 – Conjunto montado sem o anteparo e esquema com as dimensões em milímetros das bandejas.

O tempo total do teste é de 120 minutos, determinado a partir de ensaios preliminares que mostraram ser este o tempo suficiente para combustão total dos briquetes. A carga é limitada pelo volume do combustor $1,25\text{dm}^3$.

A temperatura e a massa consumida são anotadas a cada 5 minutos, do tempo inicial igual a zero até 120 minutos.

O índice de combustão foi calculado pela fórmula:

$$\text{Índice de combustão} = A \times B / 100 \times C,$$

onde: A = porcentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150° , tomada em relação ao tempo total de 120 min.;

B = porcentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150°C ;

C = porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C .

O ICOM, assim calculado, é um número adimensional. As unidades se anulam no cálculo das porcentagens e estas se cancelam com a divisão por 100.

A Figura 4 ilustra as condições para obtenção dos parâmetros mencionados.

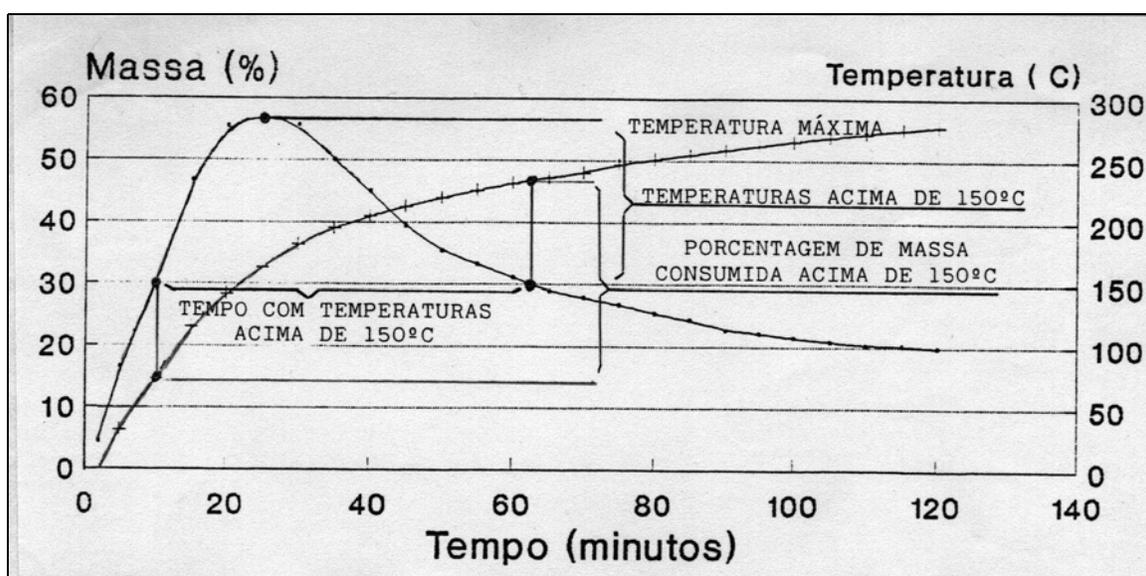


Figura 4 – Curvas típicas “temperatura x tempo” e “porcentagem de massa consumida x tempo” com seus pontos característicos, para obtenção do ICOM.

A temperatura de 150°C foi estabelecida após verificação prévia de que, em nenhum ensaio realizado, a temperatura máxima durante a combustão dos briquetes foi inferior a este valor. A escolha destes parâmetros para compor o ICOM deve-se ao fato de se esperar que um bom briquete forneça as mais altas temperaturas durante o maior tempo e consumindo a menor quantidade de massa possível.

Para ignição dos briquetes, foi usada uma quantidade de 14ml de álcool, em uma placa de Petri colocada logo abaixo da grelha do combustor. Esta quantidade de álcool foi consumida em aproximadamente um minuto, não interferindo diretamente na primeira medição aos cinco minutos.

Para fazer uma análise de correlação das propriedades e características dos briquetes

com o índice de combustão calculado, utilizou-se o Sistema de Análise Estatísticas - SAS, no Laboratório de Métodos Quantitativos do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP.

C ICOM foi calculado para os briquetes das quatro procedências brasileiras, de uma americana e de uma argentina, pois não se dispunha para as demais de material suficiente para o número de repetições necessárias.

RESULTADOS E DISCUSSAO

1. Características dos briquetes

A Tabela 1 apresenta a análise imediata e o poder calorífico superior dos briquetes de todas as procedências analisadas neste trabalho.

Tabela 1 – Análise imediata e poder calorífico superior dos briquetes.

Briquete	Umidade (%)	Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Cinza (%)	PCS (Kcal/Kg)
BR1	8,72	31,63	52,73	15,63	5,598
BR2	6,49	20,21	43,27	36,54	4,704
BR3	6,86	23,28	75,84	0,88	7,205
BR4	7,20	22,72	52,13	25,16	5,865
EUA1	5,45	20,46	42,50	37,04	4,311
EUA2	5,78	31,22	42,34	26,44	4,662
EUA3	7,46	22,75	56,83	20,42	5,274
ARG1	8,79	28,18	54,43	17,39	5,149
ARG2	8,17	30,83	57,04	12,08	5,510
Médias	7,21	25,70	54,12	21,28	5,364
C.V.	16,65	18,52	19,72	54,37	15,88

QBS.: Os resultados individuais apresentam a média de 10 repetições para PCS e 5 para os demais parâmetros.

PCS = poder calorífico superior.

C.V. = coeficiente de variação.

A Tabela 1 mostra as médias das densidades relativa aparente e verdadeira, porosidade e densidade a granel. Apresenta, também, a porcentagem de finos abaixo de 15mm, gerados no teste de tamboramento e a carga de ruptura, obtida no teste de compressão.

Tabela 2 – Características físicas dos briquetes

Briquete	Densidade Aparente (g/cm ³)	Densidade Verdadeira (g/cm ³)	Porosidade (%)	Densidade a granel (Kg/m ³)	Friabilidade (%)	Carga de ruptura (Kg)
BR1	0,74	1,68	55,76	349,06	14,31	14,35
BR2	0,91	1,55	41,83	400,54	31,43	18,45
BR3	0,71	1,47	51,70	393,28	2,48	65,00
BR4	0,69	1,45	53,40	133,18	56,44	24,90
EUA1	0,99	1,63	38,85	547,60	12,53	28,50
EUA2	0,95	1,92	50,52	**	**	**
EUA3	0,85	1,94	56,02	484,40	3,89	29,00
ARG1	0,98	1,61	40,24	557,64	19,32	32,66
ARG2	0,83	1,61	49,17	531,76	4,05	40,82
Médias	0,85	1,65	48,11	424,56	18,05	31,71
C.V.	13,65	10,58	13,68	33,34	101,24	49,62

* Porcentagem de finos abaixo de 15mm, gerados no teste de tamboramento.

** Não determinado em razão da não-disponibilidade de material.

C.V. = coeficiente de variação.

Na Tabela 2 observa-se que os briquetes estrangeiros apresentam densidades relativa aparente e a granel, visualmente mais elevadas que os brasileiros. A porosidade média dos briquetes brasileiros é de 50,67% e dos estrangeiros é de 40,69%. A porosidade do briquete EUA1 é destacadamente menor que os demais, sendo sua densidade a granel a segunda maior de todos os briquetes testados e, sua densidade relativa aparente, a maior de todos.

Ainda na Tabela 2, observa-se, pelo coeficiente de variação das médias das densidades relativa aparente verdadeira e da porosidade, que os valores desses parâmetros não variam tanto. A densidade a granel, ou massa específica, com um coeficiente de variação de 33,34%, mostra que as variações são elevadas. Isto significa que se o desempenho de um briquete na combustão depender da densidade a granel, encontram-se justificativas para significativas variações de desempenho.

A friabilidade ou resistência à abrasão e a resistência ao esmagamento, representada pela carga de ruptura, variam bastante, principalmente entre os briquetes brasileiros.

A Tabela 3 apresenta resultados de correlação linear entre os parâmetros determinados para caracterização dos briquetes.

Verifica -se que, dos parâmetros indicados na Tabela 1, o que apresenta maior coeficiente de variação é o teor de cinzas. Investigando-se tal fato e o seu possível relacionamento com os demais parâmetros, -constata-se que estatisticamente o teor de cinzas_ mostra maiores índices de correlação linear com o teor de carbono fixo e com o poder calorífico, sendo ambas correlações inversas, como pode ser visto na Tabela 3. Esta elevada correlação inversa é explicável, visto que a cinza é material de origem mineral, não-orgânica, inerte e não-combustível. O teor de carbono fixo e o poder calorífico dependem da quantidade de material orgânico presente no combustível.

Tabela3 - Índice de correlação linear (R)* entre parâmetros

Parâmetros	Materiais voláteis	Carbono fixo	Poder calorífico	friabilidade	
Cinzas	0,57	0,94	0,89	0,47	0,70
Carbono fixo	0,26	1,00	0,96	0,43	0,84
Mat. Volátil	1,00	0,26	0,24	0,29	0,03
Dens. Rel.	-	-	-	-	-
Aparente	0,39	0,68	0,85	0,20	0,23
porosidade	0,65	0,58	0,73	0,05	0,06

* São apresentados somente os valores para os parâmetros que mostraram alguma correlação estatística.

O carbono fixo, como era esperado, apresenta elevado índice de correlação linear com o poder calorífico. Ao contrário da expectativa inicial, o teor de cinzas não apresenta correlação linear com a densidade verdadeira e nem com a densidade relativa aparente. Esperava-se que a cinza pudesse participar na composição do briquete como um densificador, como ocorre se o carvão mineral e o antracito são adicionados ao briquete, segundo mostra MESSMAN_& TIBBETTS (19). Isto pode ser explicado porque a densidade relativa aparente tem elevada dependência do processo (compactação e granulometria do carvão), e, no caso da densidade verdadeira, a dependência é quanto à natureza das cinzas.

Observa-se ainda na Tabela 3, que a resistência do briquete à ruptura pela compressão apresenta boas correlações lineares com o teor de carbono fixo e com o teor de cinzas, sugerindo-se que deve haver aumento de resistência do briquete com redução do teor de cinzas e, conseqüentemente, aumento do teor de carbono fixo.

A correlação inversa entre densidade relativa aparente e poder calorífico se deve ao fato específico dos briquetes analisados, onde, por exemplo, se verifica que o briquete de maior densidade relativa (EUA1) possui o menor poder calorífico, e o briquete de menor densidade relativa (BR4) apresenta um poder calorífico bem acima deste.

O briquete é um produto composto de diferentes substâncias (carvão vegetal, cinzas, carvão mineral, aglomerante, umidade, serragem, nitrato de sódio), como já mencionado, variando esta composição de procedência para procedência. Justifica-se um comportamento diverso nas análises de correlação estatística diferente de produtos muito mais homogêneos como a madeira e o carvão vegetal, que apresentam correlação linear positiva. Além disso, cada briquete de determinada procedência tem o seu processo de produção, onde podem ocorrer diferentes pressões resultando variações na densificação.

2. Comportamento dos briquetes na combustão

Ao analisar o comportamento dos briquetes durante a combustão, verifica-se, pela Figura 5, que mostra os gráficos tempo x temperatura, que a temperatura máxima alcançada varia de acordo com a procedência dos briquetes.

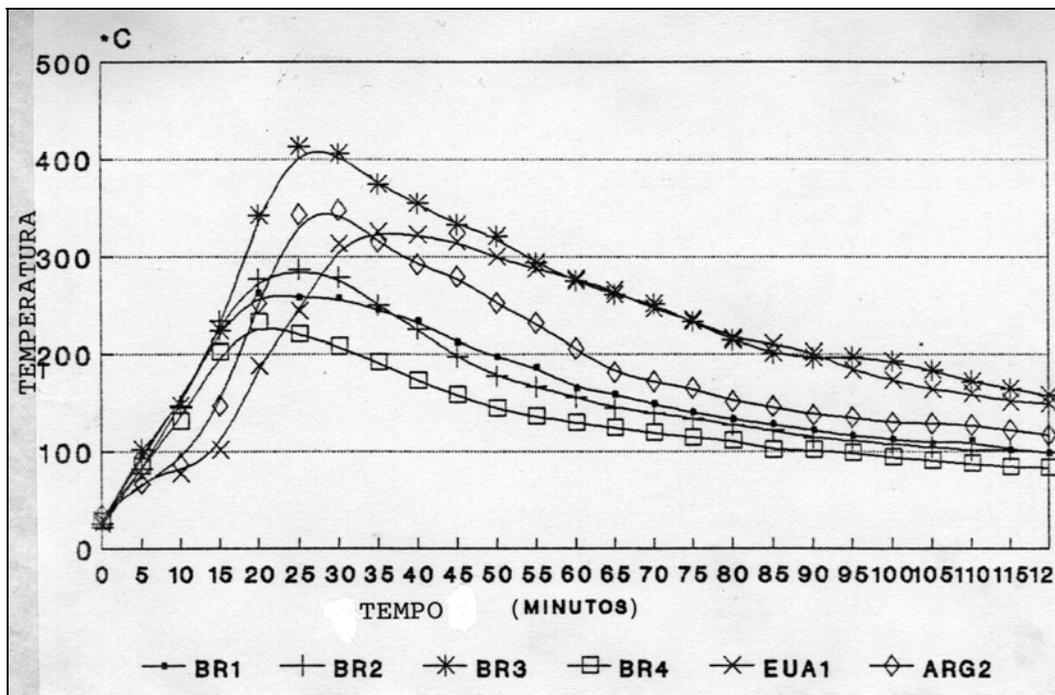


Figura 5 – Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão.

A análise de variância da Tabela 4 comprova estatisticamente a existência de tal variação. No entanto, o tempo para alcançar a temperatura máxima não varia de maneira significativa independente da procedência e, conseqüentemente, da qualidade do briquete, conforme mostra a análise da variância da Tabela 5.

Tabela 4 – Análise da variância da temperatura máxima pelo teste F.

Repetições da temperatura máxima					
	1	2	3	4	5
BR1	235	265	360		
BR2	308	265	298		
BR3	390	472	391		
BR4	157	233	214	245	233
EUA1	384	280			
ARG2	365	375			
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F 8,7704**	
	5	88870,5779	17774,1155		
Resíduo	12	24319,2001	2026,600		
Total	17	113189,778			

** Variação significativa ao nível de 1% de probabilidade.

G.L. – grau de liberdade; S.Q. – soma dos quadrados; Q.M. – quadrado médio.

Tabela 5 – Análise da variância do tempo para garantir a temperatura máxima pelo teste F.

Repetições do tempo para atingir a temperatura máxima					
	1	2	3	4	5
BR1	25	20	30		
BR2	25	25	25		
BR3	25	25	30		
BR4	30	25	25	20	25
EUA1	30	35			
ARG2	25	30			
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F 0,36694ns	
	5	154,16667	30,8333		
Resíduo	12	1008,33333	84,0277		
Total	17	1162,5			

ns= não significativo

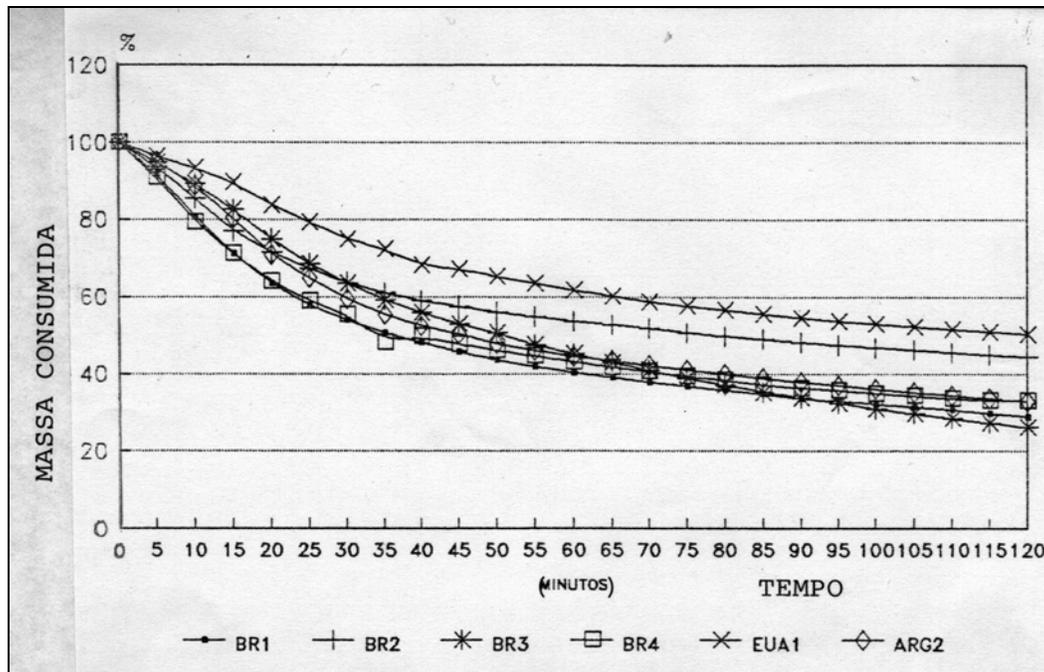


Figura 6-Consumo de massa durante o teste de combustão

A Figura 6 e a Tabela 6 mostram que a procedência EUA1 consome menor porcentagem de massa durante o teste de combustão 49,68%. Alcança a terceira maior

temperatura máxima e termina o teste com a segunda maior temperatura final. Os briquetes desta procedência possuem 37,04% de cinzas (Tabela 1) na sua composição.

Os briquetes da procedência BR3, possuindo menos de 1% de cinzas (Tabela 1), apresentam a maior temperatura máxima; no entanto, consomem 73,81% da massa total, terminando o teste praticamente com a mesma temperatura do EUA1, como se vê na Figura 5.

Observa-se que, mesmo consumindo uma porcentagem de massa muito menor, o EUA1 apresenta comportamento mais homogêneo na geração de calor.

Para cozimento e aquecimento é interessante a manutenção de uma determinada temperatura média, não sendo oportuno picos de temperatura elevada, tornando necessário realimentações freqüentes de combustível, para manutenção dessa temperatura.

Conclui-se, portanto, que se o elevado teor de cinzas dos briquetes da procedência EUA1 não prejudicam a combustão, e não havendo outro fator que justifique seu bom desempenho (como poder calorífico nem teor de carbono fixo elevados), o teor de cinzas deve colaborar favoravelmente na conservação do calor.

Os briquetes da procedência EUA1 apresentam o ICOM mais elevado – 1,23 (Tabela 6), confirmando e colaborando com a hipótese de os mesmos possuírem o melhor desempenho global na combustão dentre todas as amostras analisadas. Isto significa que o EUA1 gera mais energia (calor) com o menor consumo de massa combustível.

Comparando os briquetes das procedências de maior e menor ICOM, verifica-se (Figura 5), que a área sob as curvas "temperatura x tempo" representa a energia gerada durante o tempo de teste, ou a quantidade de calor, fornecida pela combustão dos briquetes. Nessa figura, constata-se que a menor área está sob a curva do BR4, que é também a procedência que apresenta o menor ICOM. Os briquetes da procedência EUA1 apresentam o maior ICOM, e a área sob sua curva correspondente na Figura 5 é a segunda maior.

No entanto, é necessário lembrar que no cálculo do ICOM entra a porcentagem de massa consumida durante o teste, sendo que o EUA1 consome a menor porcentagem de massa de todas as procedências, e o BR4 está entre os maiores consumidores, como pode ser observado na Figura 6. Portanto, se os briquetes de uma procedência geram bastante energia (quantidade de calor) durante o teste, mas, em contrapartida, consomem muita massa para gerar essa energia, provavelmente o seu ICOM não será elevado. Um exemplo disto acontece com os briquetes da procedência ARG2. Apesar de apresentarem a segunda maior temperatura máxima e a maior temperatura final, consomem bastante massa, ficando, em consequência, com o terceiro ICOM, como pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Índice de combustão (ICOM), temperaturas máxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima (Tmax) e na temperatura final (Tfinal) do teste.

Procedência	T. Max.* (°C)	T. final (°C)	Consumo de massa		ICOM
			T. max. (%)	T. final (%)	
BR1	250,2	97,7	42,16	71,07	0,5462
BR2	286,5	99,4	32,67	55,54	0,6614
BR3	413,3	157,5	31,49	73,81	0,9126
BR4	232,0	81,1	35,01	66,91	0,3124
EUA1	325,0	149,0	27,56	49,68	1,2307
ARG2	347,3	122,7	40,54	67,11	0,8432

OBS.: Valores correspondentes às médias das repetições.

* Valores obtidos de uma curva média.

Analisando o ICOM segundo as propriedades físicas, verifica-se que o BR4 apresenta a menor massa específica (densidade a granel), e o EUA1 a maior.

Examinando-se a Tabela 6, verifica-se que existe correlação estatística linear com $r = 0,9$ entre a temperatura máxima (Tmax.) e a temperatura final do teste (Tfinal). Não se encontrou correlação estatística entre temperatura final e massa consumida na temperatura final, assim como entre a temperatura máxima e consumo de massa na temperatura máxima. Isto mostra que a temperatura de combustão depende de outros fatores além da quantidade de massa consumida na combustão.

Utilizando-se o sistema de Análise Estatística – SAS, para estudar as possíveis correlações do ICOM com as principais variáveis, verificou-se que a maior correlação estatística do ICOM é com a massa específica (densidade a granel), por meio de uma função exponencial. Pelo teste F, esta correlação é significativa ao nível de 0,1% de probabilidade, conforme mostra a Tabela 7. A função que melhor representa esta correlação é $ICOM = \exp(3,23484 + 0.00263 \text{ DGRA})$ com $R^2 = 0,72$. Esta correlação estatística entre ICOM e DGRA demonstra a importância da forma do briquete, diminuindo o volume de vazios na carga de combustão.

Tabela 7 – Análise da variância da correlação do índice de combustão (ICOM) com a densidade a granel (DGRA).

Procedência	DGRA (Kg/cm ³)	ICOM *ajustado	ICOM Real	
BR1	348,06	0,6344	0,5462	
BR2	400,54	0,7734	0,6614	
BR3	393,28	0,7146	0,9126	
BR4	133,18	0,3606	0,3124	
EUA1	547,60	1,0723	1,2307	
ARG2	531,76	1,0286	0,8432	
	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
	1	2,472336	2,472336	38,83**
Resíduo	15	0,955045	0,063669	
total	16	3,4277381		

** Correlação significativa ao nível de 0,1% de probabilidade.

* ICOM ajustado = obtido por meio da equação exponencial.

Não se encontrou correlação estatisticamente significativa do ICOM com nenhuma outra variável analisada.

Finalmente, pode-se comentar que os resultados confirmam, mais uma vez, a importância que assumem o processo de densificação na briquetagem, a forma e as dimensões conferidas ao briquete na prensagem.

CONCLUSÕES

Diante dos testes executados, dos resultados obtidos e discutidos neste trabalho, pode-se concluir que:

a – o índice de combustão (ICOM), proposto neste trabalho, é indicativo satisfatório do comportamento de um briquete durante a combustão, atendendo com objetividade e segurança a necessidade de comparar a qualidade de diferentes briquetes, e criando a possibilidade futura de se estabelecer, por meio dele, classes de qualidade de briquetes de carvão vegetal;

b – a compactação é fator preponderante para a qualidade de um briquete de carvão vegetal e de seu comportamento na combustão;

c – a densidade a granel é a característica que apresentou maior correlação com o "índice de combustão", demonstrando não só a importância da densidade relativa aparente do briquete, como de sua forma e dimensões, com a conseqüente melhor ocupação dos espaços vazios na carga em combustão;

d – características como poder calorífico, teor de carbono fixo, teor de cinzas, individualmente não apresentaram importância significativa para representar a qualidade de um briquete na combustão, quando comparado com a densidade a granel;

e – o elevado teor de cinzas não é fator limitante para o desempenho de um briquete de carvão vegetal na combustão;

f – o melhor briquete dentre todas as procedências analisadas, segundo o índice de combustão, foi originário dos Estados Unidos da América, identificado como EUA1. O melhor briquete dentre os brasileiros foi o BR3, que na classificação geral de qualidade ficou em segundo lugar. As quatro procedências brasileiras apresentaram elevada variação de qualidade, alcançando os extremos dos valores observados para o índice de combustão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 – ANTUNES, R. da C. Briquetagem de carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/CETEC. Carvão Vegetal: destilação, propriedades e controle de qualidade. Belo Horizonte, 1982. 205p.

2 – ASSI, A. et alii. Perspectivas do carvão babaçu como alternativa energética na siderurgia brasileira. Metalurgia ABM, São Paulo, 38 (292) : 125 – 31, mar. 1982.

3 – BAKER, A. J. Charcoal Industry in the U.S.A. In: SYMPOSIUM ON FORESTRY PRODUCTS RESEARCH INTERNATIONAL ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE, Pretoria, 1985. Proceedings. Pretoria. Council for Scientific and Industrial Research. National Timber Research Institute, 1985. v5.

4 – BRASIL, MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Balanço energético Nacional. Brasília, 1986. 136p.

5 – BRITO, J. O. & DE NUCCI, O. Estudo tecnológico da madeira de Pinus SSP para a produção de carvão vegetal e briquetagem. IPEF Piracicaba: 25-30, abr, 1984.

6 – BRITO, J. O. Estudo sobre a produção de carvão e briquetes de carvão de casca de pinus. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" . 1986. 58p.

7 – BROSCH, C. D. & FURUNO, J. K. Aproveitamento dos finos de carvão vegetal. Divisão de metalurgia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM 12, Vitória, 1968. (contribuição técnica 748).

8 – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – Simple technologies for charcoal making. Rome 1983 p. 109-111. (Forestry Paper, 41).

9 – FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; ARAKARI, E. O. Aspectos técnicos de briquete de carvão vegetal no Brasil. Brasília, LPF, 1989. 14p. (Série nº 1).

10 – FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; PASTORE JR., F.; FILGUEIRAS, S. M. S. Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais/DPQ/IBDF, 1984. Sp.

11 – GOMES, P. A. Caracterização de briquetes de carvão vegetal para utilização doméstica. Belo Horizonte: CETEC 1985. 28p.

12 – HAIGH, P. D. Profitable charcoal briquetting. In: FPRS NATIONAL MEETING,

12, Madison, jun. 22-27, 1958. Proceedings. Madison: Forest Products Journal. 1958. p. 66A-68A.

13 – INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL-IBDF. Programa de Briquetagem do Laboratório de Produtos Florestais. Brasília, 1985. 14p.

14 – KOMAREK RESEARCH. The briquetting process/K.R. Komarek Research – Anninston, s.d. 380.; ilus.

15 – KULAGIN, E. P. Petroleum bitumens as binder for briquetting charcoal fines Sb. Tr. TNI 1 Prockt., URSS Inst. Lesokhim. Prom. (21): 948, 1971. (a)

- 16 – KULAGIN, E. P. Petroleum as binder for briquetting charcoal fines. Sb. Tr. TNI 1 Prockt. URSS Inst. Lesokhim. Prom., (21): 904, 1971. (b)
- 17 – KULAGIN, E. P. & TREFILOVA, V. A. Effect of roasting temperature on the properties of briquettes from wood charcoal fines and from lignosulfonates. URSS. Gidroliz. Lesokhim Prom. (24): 112, 1971.
- 18 – KULAGIN, E. P. & PASSADINA, E. S. Dependence of charcoal briquettes on the amount of binder. URSS. Gidroliz. Lesokhim. (21): 1415, 172.
- 19 – MESSMAN, H. C. & TIBBETTS, T. E. Elements of briquetting and agglomeration. Canada; Institute for Briquetting and Agglomeration, 1977, 105p.
- 20 – MOTTER, D.; ARFELD, E.D.; RODRIGUEZ, M. C. C. Aproveitamento dos finos de carvão vegetal para produção de briquetes de uso siderúrgico. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 43, Porto Alegre, 1979. 16p.
- 21 – OLIVEIRA, L. DE; GARCIA, R. V.; COLLET, F. S. Aglomeração dos finos de carvão vegetal. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 14, Belo Horizonte, jul. 1985. (contribuição técnica 341).
- 22 – OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. Belo Horizonte, fundação CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS, 1982.
- 23 – PIETSCH, W. Roll Pressing U.S.A.: heiden, 1976, 137p.
- 24 – QUIRINO, W. F. et alii. Briquetagem de carvão vegetal e resíduos. Brasília, Laboratório de Produtos florestais In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 5, Rio de Janeiro, 1987. 9p.
- 25 – QUIRINO, W.F. & DIAS, H. A. Teste de acendimento de briquetes de carvão vegetal para uso doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 5, Rio de Janeiro, 1986.
- 26 – SALEME, J. E. F. Estudo básico para briquetagem do carvão vegetal. Ouro Preto, Escola de Minas e Metalurgia, s.d. 19p.
- 27 – SILVA, Y. I. A. da; et alii. Briquetagem de carvões para fabricação de coque metalúrgico. Metalurgia ABM, São Paulo, 267 (36): 9599, 1980.
- 28 – SILVEIRA, R. C. da, & CAMPOS, V. F. Utilização de finos de carvão vegetal. Metalurgia ABM. São Paulo, 237 (33): 497501, ago, 1977, 237. ago. 1977. p497-501.
- 29 – ULHOA, M. B.; BORBA, P. E. M.; SILVA, Y. I. A. da Emprego de carvão vegetal em coqueiras através do processo de coqueificação mistura-briquete. Metalurgia ABM, São Paulo, 329 (41): 1858, 1985.