CARACTERISTICAS E INDICE DE COMBUSTAO DE BRIQUETES DE CARVAO VEGETAL

WALDIR FERREIRA QUIRINO
Engenheiro Florestal

Orientador: Prof. Dr. Jose Otàvio Brito

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Abril - 1991

CARACTERISTICAS E INDICE DE COMBUSTAO DE BRIQUETES DE CARVAO VEGETAL

WALDIR FERREIRA QUIRINO

Aprovado em: 05.04.1991

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Luiz Ernesto George Barrichelo	ESALQ/USP
Prof. Dr. Carlos A. Luengo	DFA/UNICAMP
Dr. Marcos A. E. Santana	LPF/IBAMA

p/ Prof. Dr. José Otàvio Brito

Orientador

AGRADECIMENTOS

-em especial ao orientador e amigo Prof. Jose Otàvio Brito;

-aos colegas do Laboratòrio de Produtos Florestais, sempre dando total apoio durante esta jornada;

-aos Professores Jose Nivaldo Garcia, Fabio Poggiani e Tadeu Zarate do Couto;

-ao Prof. Luiz Ernesto G. Barrichelo;

-aos funcionàriows e tècnicos Janete, Beatriz, Udimilson, Sr. Nelson e, Milton;

-a todos colegas da Pos-Graduação;

-aos funcionàrios e tècnicos do IPEF;

-aos funcionàrios e tècnicos do Departamento de Ciências Florestais;

-a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior - CAPES;

-ao ex-Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal - IBDF, e atual Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renovàveis - IBAMA;

-a todos que direta ou indiretamente contribuiram com meu curso na ESALQ-USP, e que involuntariamente tiveram seus nomes aqui omitidos.

Dedico

a minha esposa VERA

e aos meus filhos Leticia

Rafael

Igor

INDICE

página

LISTA DE TABELAS..... iv

LISTA DE FIGURAS..... v

RESUMO..... vi

SUMMARY..... ix

1. INTRODUÇAO..... 1

2. REVISAO DE LITERATURA..... 5

2.1 Aspectos gerais sobre briquetagem..... 5

2.2 Processo de briquetagem..... 7

2.3 Aglutinantes, lubrificantes e aditivos..... 9

2.4 Qualidade dos briquetes e seu uso..... 13

3. MATERIAIS E METODOS..... 23

3.1 Caracterizacão dos briquetes..... 24

3.2 Teste de combustão..... 27

4. RESULTADOS E DISCUSSAO..... 33

4.1 Caracteristicas dos briquetes..... 33

4.2 Comportamento dos briquetes na combustão... 38

5. CONCLUSOES..... 48

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS..... 50

7. ANEXOS..... 55

LISTA DE TABELAS

TABELA No. página

01 Caracteristicas de briquetes comercializados no Brasil em 1985 15

02 Identificação, forma, dimensões e quantidades de briquetes disponiveis para este trabalho 24

03 Anàlise imediata e poder calorifico superior dos briquetes 33

04 Caracterisiticas fisicas dos briquetes 34

05 Indice de correlação linear (R) entre parâmetros 36

06 Anàlise da variância da temperatura màxima pelo teste F 39

07 Anàlise da variância do tempo para atingir a temperatura màxima pelo teste F 40

08 Indice de combustão (ICOM), temperatura màxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida atè a temperatura màxima (Tmax) e na temperatura final (Tfinal) do teste 44

09 Anàlise da variância da correlação do indice de combustão (ICOM) com a densidade a granel (DGRA) 46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA No. página

01 Conjunto de teste mostrando balança, combustor, registrador de temperatura e termômetro digital, e esquema comas dimensões em mm do anteparo do combustor.....27

02 Detalhe do combustor mostrando a grelha, gabarito fixador da altura dos termopares e esquema com as dimensões do combustor.....28

03 Conjunto montado sem o anteparo, e esquema com as dimensões em mm das bandejas.....29

04 Curvas tipicas "temperatura x tempo" e "porcentagem de massa x tempo" com seus pontos caracteristicos, importantes para obtenção do ICOM.....31

05 Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão.....38

06 Consumo de massa durante o teste de combustão.....42

07 Função que melhor correlaciona o indice de combustão (ICOM) com a densidade a granel.....47

CARACTERISTICAS E INDICE DE COMBUSTAO DE BRIQUETES DE CARVAO VEGETAL

Autor: Waldir Ferreira Quirino

Orientador : Prof. Dr. Jose Otàvio Brito

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo analisar as caracteristicas de briquetes de carvão vegetal de vàrias procedências (Brasil, EUA e Argentina), e verificar a influência das mesmas sobre seus desempenhos quando submetidos ao processo de combustão. Para avaliar tais desempenhos, preconizou-se um indice denominado "indice de combustão" (ICOM), integrando num sò valor o tempo de combustão, a temperatura gerada durante a combustão e a massa consumida para gerà-la. Para a caracterização dos briquetes foram determinados: umidade, teores de materiais volàteis, cinzas e carbono fixo, poder calorifico, densidade, porosidade, friabilidade e resistência a compressão.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

a. è possivel a aplicação do indice de combustão como indicador de comportamento da combustão dos briquetes, sendo que, quanto maior for este indice, melhor será o desempenho global e, consequentemente, melhor será a qualidade do briquete;

b. o briquete que apresentou o maior indice de combustão, apresentou também o mais baixo poder calorifico, o maior teor de cinzas, a maior densidade relativa aparente e a maior massa especifica (densidade a granel);

c. a nivel de significância estatistica, a massa especifica foi a caracteristica que apresentou a maior correlação com o indice de combustão, demonstrando que a densidade è um fator importante para a qualidade do briquete de carvão vegetal;

d. de um modo geral, os briquetes diferenciam-se em suas caracteristicas, independentemente do pais de origem, sendo que, o briquete que apresentou o melhor desempenho global na combustão e consequentemente o maior indice de combustão - ICOM, foi o briquete americano EUA1;

e. os quatro briquetes brasileiros apresentaram uma variação de qualidade elevada, alcançando praticamente os dois extremos dos valores observados para o índice de combustão. O BR3 apresentou o maior índice de combustão, sendo o melhor briquete brasileiro, e o segundo dentre todas as procedências testadas, e o BR4 apresentou o pior índice de combustão dentre todos briquetes testados.

CHARACTERISTICS AND COMBUSTION INDEX OF CHARCOAL BRIQUETS

Autor: Waldir Ferreira Quirino

Adviser: Prof. Dr. Jose Otàvio Brito

SUMMARY

The purpose of this work was to analyse the physical and chemical characteristics of charcoal briquets, produced in three countries, and to evaluate their performance during the combustion process. To evaluate the behavior of these briquets, 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.

The following conclusion were obtained from the present study:

a - it is possible to apply the combustion index, which well represents the performance of the briquets during the combustion process;

b - the highest combustion index was achieved by the briquets which presented the lowest calorific value, highest ashes content, and highest apparent, actual, and bulk densities;

c - at statistic significance level, the bulk densities was the characteristics which presented the higest correlation with the combustion index, showing that the density is very important to the quality of charcoal briquet;

d - in general, the briquets presented different characteristics independently of their sources. Based upon the combustion index the best briquet tested was the one obtained from the United States of America, identified as EUA1;

e - The four brazilian briquets presented high quality variation and they pratically reach the two extremely value of combustion index. The BR3 presented the second highest "combustion index". This briquet was the best brazilian charcoal briquet, while the BR4 showed the worst combustion index among all the briquets tested.

1. 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 as grandes distâncias internas do país, o aspecto "concentração de energia", visando viabilizar o seu transporte, torna-se relevante.

A briquetagem é uma forma bastante eficiente para concentrar a energia disponível na biomassa. Exemplifica-se este fato na consideração de que 1,00m^3 de briquetes contêm pelo menos 5 vezes mais energia que 1,00m^3 de resíduos. Isso, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio destes materiais.

A disponibilidade de lenha em algumas regiões brasileiras é crítica(FAO, 1983), dificultando e encarecendo a produção do carvão vegetal. É comum este produto ser transportado através de caminhões até os

grandes centros de consumo, em distâncias superiores a 1.000 km.

Apesar da deficiência de lenha, existe uma oferta já identificada de resíduos agroindustriais que poderiam ser aproveitados para geração de energia. Uma parcela desta biomassa já é consumida na queima direta, carecendo, todavia, de outras opções para o maior e melhor aproveitamento destes resíduos (QUIRINO et alii, 1987).

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 é praticamente inexistente no Brasil, principalmente de forma contínua, como tradicionalmente vem ocorrendo em outros países, que produzemos briquetes de carvão vegetal de longa data.

A friabilidade natural do carvão vegetal provoca uma geração de finos que pode atingir até 25% da sua produção. Diante de uma produção nacional de carvão vegetal, que atualmente é superior a 11 milhões de toneladas/ano, pode-se ter uma idéia do volume de finos de carvão vegetal que poderia ser usado como matéria-prima para briquetagem. No entanto, a produção de briquetes ainda é reduzida no país, aproveitando-se nesta atividade uma parcela muito pequena desses finos.

Por tudo isso, 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 o papel da biomassa como fonte energética, que ja é reconhecida ser 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 essencialmente teriam que abordar os aspectos relacionados ao perfeito conhecimento de suas propriedades e características. Isto permitiria uma melhor orientação para o mercado, tanto para consumidores quanto produtores, que poderiam dispor de normas de qualidade e diferentes classes de produtos. Briquetes não seriam caracterizados referencialmente ao carvão vegetal, e constituiriam-se em um energético sólido com características próprias, como verdadeiramente o são. Possuem o pó de carvão vegetal como matéria-prima básica, podendo no entanto, contar com outros diversos componentes.

Diante do exposto, desenvolveu-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, analisou-se 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.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais sobre briquetagem

Ilustrando que a briquetagem não é uma técnica tão atual, ANTUNES (1982) relata que a aglomeração manual de finos de carvão mineral é conhecida desde tempos antigos na China e na Inglaterra, mediante o uso de aglomerantes de origem mineral, vegetal e animal. No entanto, a fabricação mecanizada só teve início na primeira metade do século passado com as máquinas de rolos cilíndricos. O objetivo básico da invenção desse equipamento segundo PIETSCH (1976) foi o de encontrar uma maneira econômica de aglomerar finos de carvão mineral.

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

Com a evolução do consumo de petróleo após a Segunda Guerra Mundial, o uso de briquetes retraiu juntamente com os outros combustíveis sólidos.

Registra-se que em 1915 foi construída uma fábrica de briquetes no Tennesse - EUA, usando o alcatrão vegetal como ligante, com posterior tratamento para eliminar "fuligem". Posteriormente, a Ford construiu uma fábrica em Michigan, aproveitando aparas da carroceria do Ford - T, usando como ligante o amido (ANTUNES, 1982).

Em 1948, segundo BAKER (1958), começam a funcionar os primeiros fornos de carbonização contínua de resíduos nos EUA, denominados "Herreshoff Furnace", com capacidade geralmente de 1 (uma) tonelada por hora e rendimento de 25% de carvão vegetal em base seca. O mesmo autor ainda mostra a evolução da produção de carvão vegetal nos EUA de 1950 à 1985, quando já nesta data toda a produção aparece na forma de briquetes, num total de 800.000 toneladas/ano.

Há cerca de 30 anos existiam nos EUA 35 plantas de briquetagem, produzindo, segundo HAIGH (1958), 250.000 toneladas de briquetes/ano. Este autor ainda mostra detalhadamente como funcionava uma linha de briquetagem de 1 (uma) tonelada/hora, informando que o valor do investimento nesta planta era de aproximadamente US$200,000,00 (duzentos mil dólares), incluindo todo o equipamento, inclusive de empacotamento e também as

construções civis.

Na Europa as atividades de briquetagem são particularmente concentradas no carvão mineral e em menor escala, nos resíduos ligno-celulósicos.

2.2. Processo de briquetagem

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 um ligante, por ser 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, s.d.).

Um processo de briquetagem possui etapas distintas que são enumeradas a seguir:

a- moagem do carvão para adequação da granulometria do fino, determinada previamente segundo as características desejadas ao produto e em função do aglutinante usado;

b- mistura do pó do carvão com o aglutinante e demais aditivos empregados;

c- prensagem da massa obtida da mistura e;

d- tratamentos de secagem para eliminação de umidade, e tratamentos térmicos, dependendo do tipo de aglutinante, para eliminação de voláteis indesejáveis ou para favorecer reações que necessitam de calor.

Ainda, segundo SALEME (s.d.), tanto a porosidade como a solidez e resistência de um carvão vegetal, dependem das condições sob as quais foi feita a carbonização. Isto justifica o estudo das consequentes 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 evitar o trincamento do briquete na ocasião da desmoldagem.

No caso do equipamento básico do processo, que constitui o coração da briquetagem, as máquinas de rolos cilíndricos, segundo PIETSCH (1976), possuem um mérito particular de compactar grandes quantidades de briquetes a baixo custo, sendo empregadas atualmente em vários segmentos industriais para compactação de diversos produtos, trabalhando inclusive a temperaturas acima de 1.000 graus Celsius.

2.3. Aglomerantes, lubrificantes e aditivos

MESSMAN & TIBBETS (1977) afirmam que os aglomerantes são materiais essenciais para auxiliar a briquetagem econômicamente. Teoricamente alguns materiais sólidos podem ser compactados sem aglomerantes, se altas pressões são aplicadas, o carvão vegetal é compactado com aglomerante. Segundo SALEME (s.d.), o aglomerante deve comportar-se como um simples adesivo que ligue duas superfícies inertes, promovendo a soldagem das partículas.

PIETSCH (1976), afirma que os aglomerantes podem ser de três tipos: tipo matriz, tipo filme, e químico.

Aglomerantes do tipo matriz envolvem completamente as partículas formando uma matriz contínua. Quantidades razoáveis são requeridas do aglutinante porque geralmente estas substâncias apresentam baixa resistência, sendo esta resistência dependente de uma fase contínua em volta das partículas individuais. Exemplos desses aglomerantes são: alcatrão mineral, alcatrão de madeira, asfalto ou piche de petróleo.

Aglomerantes 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 apresentam 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 promove 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 melaço, os lignosulfatos e outros.

Os aglomerantes químicos são aqueles 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 ser do tipo matriz ou filme também, dependendo principalmente da resistência e das características dos produtos das reações. Como exemplos temos $Ca(OH)_2$ + melaço, $Ca(OH)_2$ + CO_2, MgO + Fe_3O_4, silicato de sódio + CO_2, e outros.

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

PIETSCH (1976), ainda identifica substâncias

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

Segundo MESSMAN & TIBBETTS (1977), um exemplo de adição de substâncias para facilitar o processo de aglomeração é a inclusão de borax na proporção de 2-3% do peso do amido seco, o qual promove a distribuição perfeita da cola na superfície das partículas de carvão, o que melhora marcadamente o produto, principalmente quando o carvão mineral ou antracito é incorporado como densificador. Segundo a esses mesmos autores, os aglutinantes podem também ser divididos em orgânicos e inorgânicos. Geralmente onde se aplica 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 (1986), produzindo briquetes experimentais de carvão de casca de pinus, constatou que a granulometria do carvão, assim como a força de prensagem influenciam significativamente na densidade relativa aparente e também na resistência ao esmagamento. No trabalho foi constatado 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 pó de carvão aumentando a densidade e melhorando outras características físico-mecânicas do briquete.

KULAGIN (1971a e 1971b) aglomerando finos de carvão vegetal com piche de petróleo, na proporção de 20% da massa do carvão e a uma pressão de 250 kgf/cm^2, concluiu que: os briquetes produzidos possuiam uma elevada resistência a umidade; sua resistência mecânica permaneceu inalterada após 24 horas imerso em água; a prensagem foi feita a temperatura normal apresentando uma resistência ao esmagamento satisfatória, na faixa de 120-150 kgf/cm^2. E ainda, um tratamento térmico nos briquetes produziu cerca de 10% de condensados, 20% de gás com poder calorífico de 2400 $kcal/m^3N$ e 70% de briquetes calcinados.

KULAGIN & TREFILOVA (1971), aglomeraram finos de carvão vegetal com 15% de licor de sulfito, a uma pressão de 250 kgf/cm^2. Esses briquetes foram aquecidos a uma temperatura final de 500 ^oC com taxas de aquecimento de 50, 200 e 400 $^oC/h$. Com taxas maiores de 200 ^oC, a produção de briquetes, de gases, e a resistência macânica diminui. Aquecendo os briquetes a uma taxa de 200 graus por hora até 800 ^oC e medindo-se as propriedades a intervalos de 100 em 100 ^oC, encontrou-se que no intervalo de 300 a 800 graus, o conteúdo de CO, H, CH_4 e o poder calorífico aumentam, enquanto o

CO_2 diminui; a higroscopicidade do briquete aumenta; a resistência à umidade permanece constante e a resistência mecânica aumenta.

KULAGIN & PASSADINA (1972), investigando a briquetagem de finos de carvão vegetal produzidos de resíduos de madeira, com quantidades variáveis de lignosulfonatos e piche de petróleo como aglutinantes, verificaram os seguintes resultados: o conteúdo de carbono (C), foi mais alto quando piche de petróleo foi usado; quando as quantidades de lignosulfonatos-(LS) foram aumentadas de 10 para 15% a resistência mecânica dos briquetes aumentou de 40-55 para 70-100 kgf/cm^2, mas o conteúdo de "C" decresceu de 84,2 para 75,3%; quando as quantidades de piche de petróleo foram aumentadas de 15 para 25% as resistências mecânicas dos briquetes aumentaram de 60-90 para 180-270 kgf/cm^2 e o conteúdo de "C" foi reduzido de 86,9 para 84,2%; o conteúdo de cinzas do LS é aproximadamente seis vezes maior que o piche, sendo que o conteúdo de cálcio nos briquetes com LS é alta. As quantidades ótimas de aglomerantes são 15% de LS e 20% em massa de piche de petróleo.

2.4. Qualidade dos briquetes e seu uso

A idéia de briquetar finos de carvão vegetal

no Brasil, começou com o início de desenvolvimento do setor industrial no país e a expansão da siderurgia a carvão vegetal.

Com a prática da seleção da granulometria do carvão vegetal, antes da utilização nos fornos de redução siderúrgica, um volume considerável de finos é acumulado. Além de baixa granulometria, esses finos possuem restrições qualitativas, pelas impurezas contidas e pela própria natureza do material de origem, carvões frágeis e de cascas, que no entanto, não inviabilizam sua utilização na briquetagem. Apenas constituem mais uma fonte de variabilidade na qualidade final do briquete produzido, segundo o INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL (1985).

Analisando em laboratório briquetes comercializados no país, e fabricados por três diferentes produtores, o INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL (1985) obteve as características mostradas na Tabela 1. Constatou-se ainda, após visita aos produtores, significativas diferenças nas plantas de briquetagem, desde o preparo da matéria-prima, o aglutinante, as prensas de cilindros rotativos de capacidade produtivas diversas, até a secagem dos briquetes por processos bastante variados.

TABELA 1. Caracteristicas de briquetes comercializados no Brasil em 1985

Produto	Anàlise imediata (%)				*Dens. apar. (g/cm3)	Friabilidade (% de finos < que 12,7 mm)
	*C.U.	*Volàt	*cinzas	*C.F.		
Briq. A	8.65	25.11	10.66	10.66	0.99	1.81
Briq. B	6.23	28.56	15.29	56.14	0.80	12.81
Briq. C	7.05	24.21	12.51	63.23	0.82	---

* C.U. - conteúdo de umidade
Volàt. - materias volàteis
C.F. - carbono fixo
Dens. apar. - densidade relativa aparente

A briquetagem è 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 (1977), essa quantidade pode variar em função da qualidade do carvão e da exigência de granulometria minima caracteristica de cada tipo de equipamento de redução.

Um dos primeiros trabalhos no Brasil, de OLIVEIRA et alii (1959), obteve interessantes resultados. Utilizando como ligante, alcatrão vegetal natural e destilado, ao qual denominaram BOP (breu + òleos pesados). Observaram a necessidade de adequar a distribuição

Observaram a necessidade de adequar a distribuição granulomètrica da "moinha" (pò de carvão vegetal) e a importância do tratamento tèrmico durante e apòs prensagem, o qual influencia a qualidade do briquete.

BROSCH & FURUNO (1968), testaram a briquetagem de finos de carvão vegetal, utilizando como aglomerante o melaço. Concluiram que a proporção de 40% de carvão vegetal para 60% de carvão mineral era satisfatòria. Esse trabalho, no entanto, pretendia estudar as tècnicas experimentais para desenvolvimento de testes futuros. Esses autores concluiram tambèm que a separação hidrogravimètrica permite apreciàvel enriquecimento da moinha em carbono, reduzindo a porcentagem de cinzas.

SILVEIRA & CAMPOS (1977), mostraram sua preocupação na utilização dos finos. Esses pesquisadores discutiram uma sèrie de alternativas, das quais a ùnica que vinha sendo aplicada na època, era a sinterização de minèrio de ferro. Uma das opções mencionadas seria a da compactação usando o briquete como redutor. Ressaltaram que a uniformidade granulomètrica do briquete permitiria uma distribuição do fluxo gasoso mais uniforme atravès da carga, a maior densidade do briquete conduziria a um menor consumo especifico de carbono. O briquete deveria ter entretanto, uma resistência, quando aquecido e sobre pressão, equivalente às condições de reação de processo no alto-forno.

A partir de 1975, ASSI et alii foi estudaram a briquetagem de carvão de babaçu, visando a obtenção de resistência à quente compatível com o uso do briquete em cubilôs e alto-forno de pequeno porte. Como aglomerante foram utilizados dextrina de milho, piche com baixo ponto de amolecimento, melaço e emulsão asfáltica. Essas experiências permitiram concluir, que è 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 a dextrina de milho como aglutinante. Com esses briquetes pode-se substituir o coque em cubilôs de 600 mm 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 à 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 alli (1985), 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 à 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.

Investigando a briquetagem dos finos de carvão vegetal, Minas Gerais, MOTTER (1979) chegou às seguintes conclusões:

- o melaço torna o briquete muito higroscópico, causando problemas na estocagem e necessitando de tratamento térmico;

- a desvolatilização da moinha antes da briquetagem diminui o consumo de ligante na produção de briquetes; e

- o briquete de maior resistência à compressão, maior carbono fixo e menos higroscópico, foi conseguido com melaço em pó, no entanto, apresentou menor reatividade.

Foram testados em diferentes fornos de redução, 340 toneladas de briquetes, conseguindo-se segundo MOTTER (1979) a substituição de até 20% do carbono fixo da carga do forno elétrico de redução sem alterar a marcha do mesmo.

Essa porcentagem de substituição é interessante, considerando-se que a geração de finos está próxima dessa proporção em relação ao carvão vegetal. Através de seus ensaios, MOTTER (1979) estabeleceu que o briquete siderúrgico deveria satisfazer os seguintes requisitos:

- teor de cinzas abaixo de 12%;

- materiais voláteis abaixo de 15%;

- carbono fixo acima de 73%;
- enxofre abaixo de 0,5% ; e
- resistência mecânica à compressão superior à 70 kg/cm2.

A FAO-FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (1983) afirma que briquetes aglutinados com amido não são adequados para uso industrial. Os briquetes usando alcatrão ou piche como aglomerante e posteriormente coqueificados, constituiriam o tipo ideal para fornos de redução e fundição, pela sua maior resistência a quente. No entanto, estes briquetes possuem um custo mais elevado de produção. Segundo ainda, ao mesmo autor, è possível adicionar materiais na composição dos briquetes abjetivando melhorar a combustão, assim como, algumas características físico-químicas, tais como, ceras nitrato de sódio, argila, sílica, e outros, que influenciam a combustão e diminuem o custo, entretanto, alteram também a qualidade.

MESSMAN & TIBBETTS (1977), afirmam também que è possível adicionar produtos combinados com os aglomerantes, com o objetivo de facilitar a ignição, prolongar a queima, aumentar a densidade e a resisitência do briquete.

As embalagens dos briquetes americanos para uso domèstico devem obrigatoriamente discriminar os ingredientes usados no produto. A partir destas embalagens

verificou-se que um briquete típico americano geralmente contém: carvão de folhosas; pó de nogueira; calcáreo agrícola; amido; umidade; e nitrato de sódio.

Um dos poucos trabalhos brasileiros que aborda a qualidade de briquetes para uso doméstico é de GOMES (1985), que comparou o comportamento de três briquetes com o carvão vegetal granulado. Os resultados obtidos não permitem conclusões sobre o comportamento qualitativo dos briquetes, apenas a referida comparação entre carvão e briquete.

A metodologia empregada por GOMES (1975), consistiu em promover a carbonização de massas constantes de briquetes e de carvão vegetal em uma churrasqueira metálica, suspensa por um cabo de aço ligado a uma balança. A temperatura foi obtida com um termopar a 12 cm da carga após 25 minutos de combustão. Anotou-se também o tempo gasto no consumo de 50% da massa em combustão. Observou-se que o carvão "in natura" apresentou a maior temperatura e em menor tempo que os briquetes. O carvão em consequência, consome 50% da massa em tempo inferior aos briquetes.

A qualidade dos briquetes, segundo KOMAREK RESEARCH (s.d.), é avaliada através de algumas propriedades peculiares dos mesmos, 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 (1986), sugeriu uma adaptação da norma ASTM 2677, afirmando ser a ignição uma das propriedades que representa um item de conforto na utilização domèstica do briquete, justificando que a norma americana restringe-se a briquetes em forma de almofada.

KOMAREK RESEARCH (s.d.), ressalta tambèm que que os briquetes podem ser avaliados quanto a sua resistência a absorção de umidade, a soluções salinas, podendo tambèm 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 tamboramente 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, mas, estes resultados devem ser interpretados com cuidado, porque são influenciados pelo tamanho e forma dos briquetes, bem como pelas propriedades dos materiais a partir dos quais são produzidos. Para muitos propòsitos, a densidade è o parâmetro de qualidade mais importante.

Como pode-se notar, relativamente pouca atenção è dada atravès da pesquisa a qualidade do briquete para uso domèstico. A maioria dos trabalhos citados refere-se a briquetes para uso industrial. A KOMAREK RESEARCH (s.d.), alega que a preocupação de qualidade do

briquete è primordialmente do produtor de briquetes, 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 domèstico no Brasil, ainda està iniciando atravès de pequenas empresas, sem capacidade para investimentos em pesquisas, justificando-se possivelmente aì, a baixa qualidade, ou a grande variabilidade de qualidade dos briquetes. O presente trabalho traz argumentos teòricos e pràticos que possibilitam melhorar o controle de qualidade desses produtos.

3. MATERIAIS E METODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Setor de Química, Celulose e Energia do Departamento de Ciências Florestais, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

Foram analisados briquetes de quatro procedências do Brasil, três dos Estados Unidos da América e duas da Argentina. Como todas referem-se a produtos comerciais, neste trabalho as mesmas 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 em suas embalagens de comércio varejista, pertenciam a um estoque de amostras existentes no Departamento de Ciências Florestais.

A prioridade que se deu para trabalhar com briquetes adquiridos no comércio varejista, teve o objetivo

de garantir a aleatoriedade da amostragem.

As quantidades aproximadas de briquetes disponiveis, para este trabalho e para cada procedência são mostradas na Tabela 2.

TABELA 2. Identificação, forma, dimensões e quantidades de briquetes disponiveis para este trabalho.

Procedência (país)	Identificação (sigla)	Forma	Dimensão (mm) (h x l x d)	Quantidade (kg)
Brasil	BR1	circular	33.7x----x39.3	50
Brasil	BR2	retangular	30.0x42.0x54.6	90
Brasil	BR3	circular	38.8x----x66.0	60
Brasil	BR4	cilindrico	49.2x----x65.4	70
E.U.A.	EUA1	quadrado	39.0x50.0x50.0	18
E.U.A.	EUA2	quadrado	34.0x50.0x50.0	5
Argentina	ARG1	quadrado	28.0x48.0x48.0	18
Argentina	ARG2	quadrado	29.0x51.0x51.0	20

OBS.: com exceção da forma cilindrica as demais são almofadadas.

3.1. Caracterização dos briquetes

Foram efetuadas análises imediatas, com as

determinações de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo, através da metodologia expressa na norma ABNT NBR 8112, sendo cinco repetições por procedência de briquete. A densidade relativa aparente foi obtida utilizando-se o metodo da balança hidrostática (M14/74), usualmente empregada para madeiras, proposta pela Associação Brasileira de Celulose e Papel. A densidade verdadeira foi obtida pelo método do picnômetro, citado por OLIVEIRA et alli (1982), e a porosidade foi obtida através da fórmula mensionada na norma da ABNT NBR 9165 (abaixo):

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

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.

O poder calorífico superior foi determinado em calorímetro isotérmico através da metodologia estabelecida na norma ABNT NBR 8633. Foram efetuadas dez repetições para cada procedência de briquete.

Para determinação da densidade a granel utilizou-se da metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 6922, para carvão vegetal. Em função da quantidade limitada

de briquetes e da homogeneidade granulomètrica dos mesmos, promoveu-se uma adaptação na norma reduzindo-se as dimensões da caixa de 600 x 600 x 600 mm para 300 x 300 x 300 mm. Efetuaram-se cinco repetições 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 (1982). Promoveu-se, pela natureza do material testado 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 utilizado no teste foi de 35 rpm, por um tempo de 15 minutos. Mediu-se os finos gerados abaixo de 15 mm apresentando-os em porcentagem.

Finalmente foi efetuado teste de carga para avaliar a resistência à compressão em máquina universal de testes Instron, com velocidade de carregamento de 0,03 cm/min.. A carga foi aplicada na menor dimensão dos briquetes que possuiam 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.

3.2. Teste de combustão

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

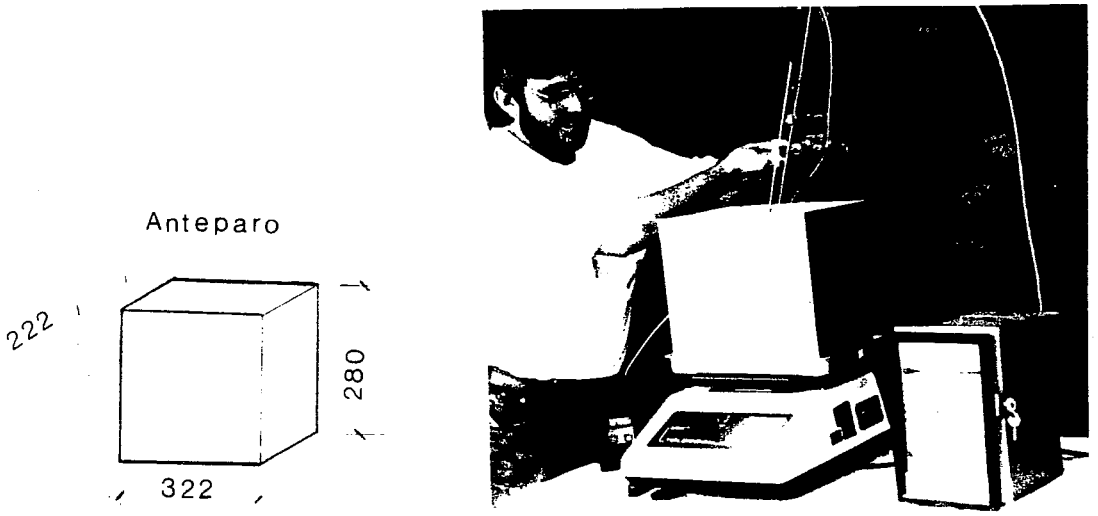
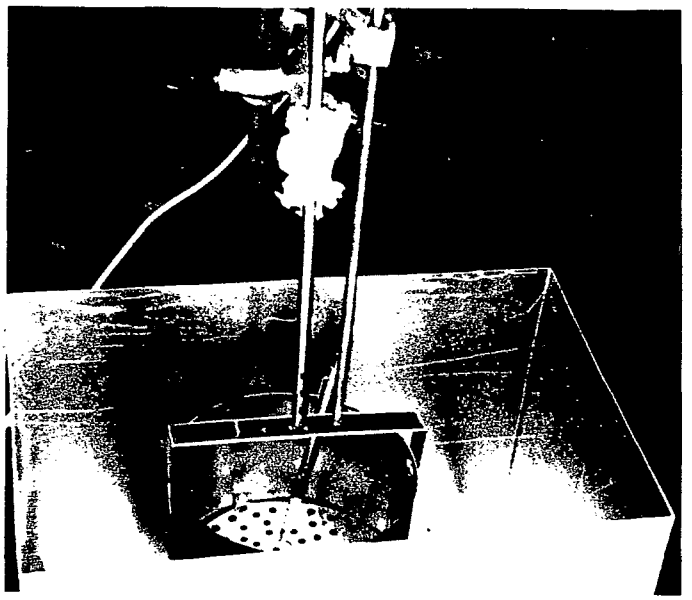


FIGURA 1. Conjunto de teste mostrando balança, combustor, registrador de temperatura e termômetro digital, e esquema com as dimensões em mm do anteparo do combustor.

O conjunto de teste è formado pelo combustor, montado sobre duas bandejas de aluminio invertidas uma sobre a outra, sendo o espaço entre as duas, preenchido com là de vidro. Um anteparo de chapa de aluminio 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 2,5 kg e precisão de 0,5g.



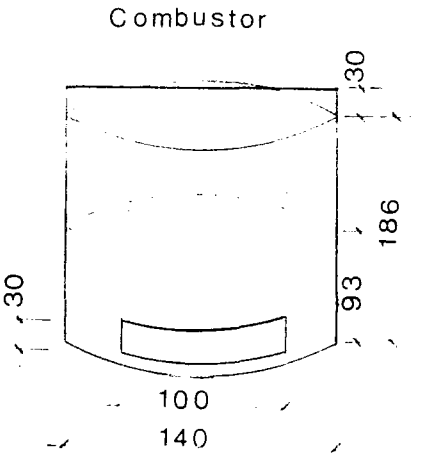


FIGURA 2 . Detalhe do combustor mostrando a grelha, gabarito fixador da altura dos termopares e esquema com dimensões do combustor em mm.

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 è possível elaborar um índice denominado neste trabalho de "índice de combustão" ou ICOM.

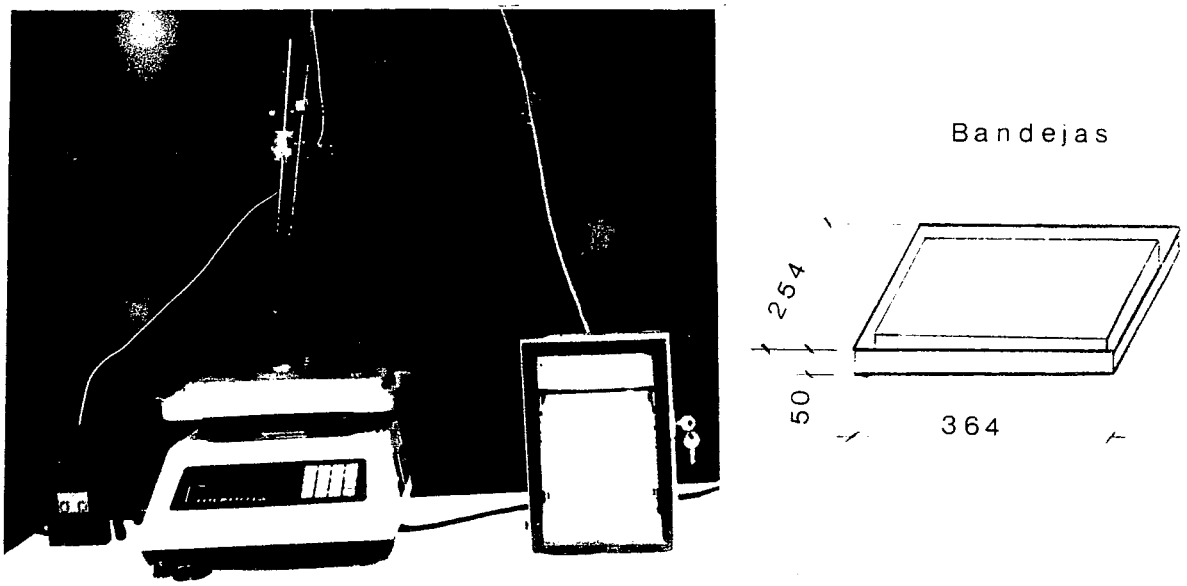


FIGURA 3. Conjunto montado sem o anteparo, e esquema com as dimensões em mm das bandejas.

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

A temperatura e a massa consumida são anotadas a cada 5 minutos, do tempo inicial igual a zero atè cento e vinte minutos.

O indice de combustão foi calculado através da fòrmula:

indice de combustão = A x B / 100 x C

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

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

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

O ICOM, assim calculado, è um nùmero admensional. As unidades se cancelam no càlculo das porcentagens e estas se cancelam com a divisão por 100.

A figura 4 apresenta um gràfico ilustrando as condições para obtenção dos parâmetros mencionados.

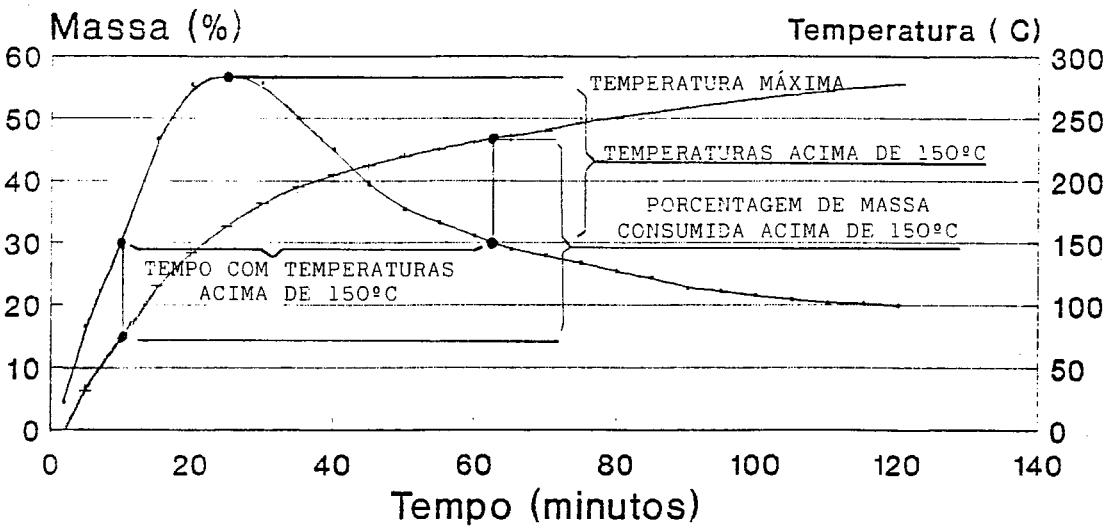


FIGURA 4. Curvas tìpicas "temperatura x tempo" e "porcentagem de massa consumida x tempo" com seus pontos caracterìsticos, para obtenção do ICOM.

A temperatura de 150 ^{o}C, foi estabelecida apòs verificação prèvia de que em nenhum ensaio realizado, a temperatura màxima 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 usado uma quantidade de 14 ml de álcool, em uma placa de Petri colocada logo abaixo da grelha do combustor. Esta quantidade de álcool foi consumida em aproximadamente 01 (hum) 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, foi utilizado o Sistema de Análise Estatísticas SAS, no Laboratório de Métodos Quantitativos do Departamento de Ciências Florestais.

O ICOM foi calculado para os briquetes das quatro procedências brasileiras, de uma americana e de uma argentina, pois para as demais não se dispunha de material suficiente para o teste com as necessárias repetições, e que foram no mínimo em número de dois até cinco repetições, dependendo da disponibilidade de briquetes para cada procedência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características dos briquetes

A Tabela 2 apresenta a análise imediata e o poder calorífico superior dos briquetes de todas as procedências analisadas neste trabalho.

TABELA 3. Análise imediata e poder calorífico superior dos briquetes.

Briquete	Umidade (%)	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)	PCS* (kcal/kg)
BR1	8.72	31.63	52.73	15.63	5598
BR2	6.49	20.21	43.27	36.54	4704
BR3	6.86	23.28	75.84	0.88	7205
BR4	7.20	22.72	52.13	25.16	5865
EUA1	5.45	20.46	42.50	37.04	4311
EUA2	5.78	31.22	42.34	26.44	4662
EUA3	7.46	22.75	56.83	20.42	5274
ARG1	8.79	28.18	54.43	17.39	5149
ARG2	8.17	30.83	57.04	12.08	5510
Médias	7.21	25.70	54.12	21.28	5364
C.V.	16.65	18.52	19.72	54.37	15.88

OBS.: 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 3 apresenta as médias das

densidades relativa aparente e verdadeira, porosidade e densidade a granel. Apresenta também a porcentagem de finos abaixo de 15 mm, gerados no teste de tamboramento e a carga de ruptura, obtida no teste de compressão.

TABELA 4. Características físicas dos briquetes.

Briquete	Densidade Aparente (g/cm^3)	Densidade Verdad. (g/cm^3)	Porosidade (%)	Densidade Granel (kg/m^3)	Friabilidade (%)*	Carga de Ruptura (kg)
BR1	0.74	1.68	55.76	348.06	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
Média	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 15 mm, gerados no teste de tamboramento.
** não determinado em razão da não disponibilidade de material.
C.V. = coeficiente de variação em porcentagem.

Na Tabela 4 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 4, observou-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 a abrasão e a resistência ao esmagamento, representada pela carga de ruptura, variam bastante, principalmente entre os briquetes brasileiros.

A Tabela 5 apresenta resultados de correlação linear entre os parâmetros determinados para caracterização dos briquetes.

Verifica-se que dos parâmetros indicados na Tabela 3 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 5. 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.

TABELA 5 Índice de correlação linear (R)* entre parâmetros

Para metros	Materiais Voláteis	Carbono Fixo	Poder Calorif.	Friabi- lidade	Carga Ruptura
Cinzas	-0.57	-0.94	-0.89	0.47	-0.70
Carb. Fixo	0.26	1.00	0.96	-0.43	0.84
Mat. Volat.	1.00	0.26	0.24	-0.29	-0.03
Dens. R. Ap.	-0.39	-0.68	-0.85	-0.20	-0.23
Porosid.	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, assim como ocorre se o carvão mineral e o antracito são adicionados ao briquete, segundo mostra MESSMAN & TIBBETTS (1977). 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 è quanto a natureza das cinzas.

Observa-se ainda na Tabela 5, 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, consequentemente, aumento do teor de carbono fixo.

A correlação inversa entre densidade relativa aparente e poder calorífico se deve ao fato específico dos briquetes analizados, onde por exemplo, verifica-se 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 è um produto composto de diferentes substâncias (carvão vegetal, cinzas, carvão mineral, aglomerante, umidade, serragem, nitrato de sódio) como ja mensionado, variando esta composição de procedência para procedência de briquete. Justificando-se um comportamento diferente 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.

4.2. 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.

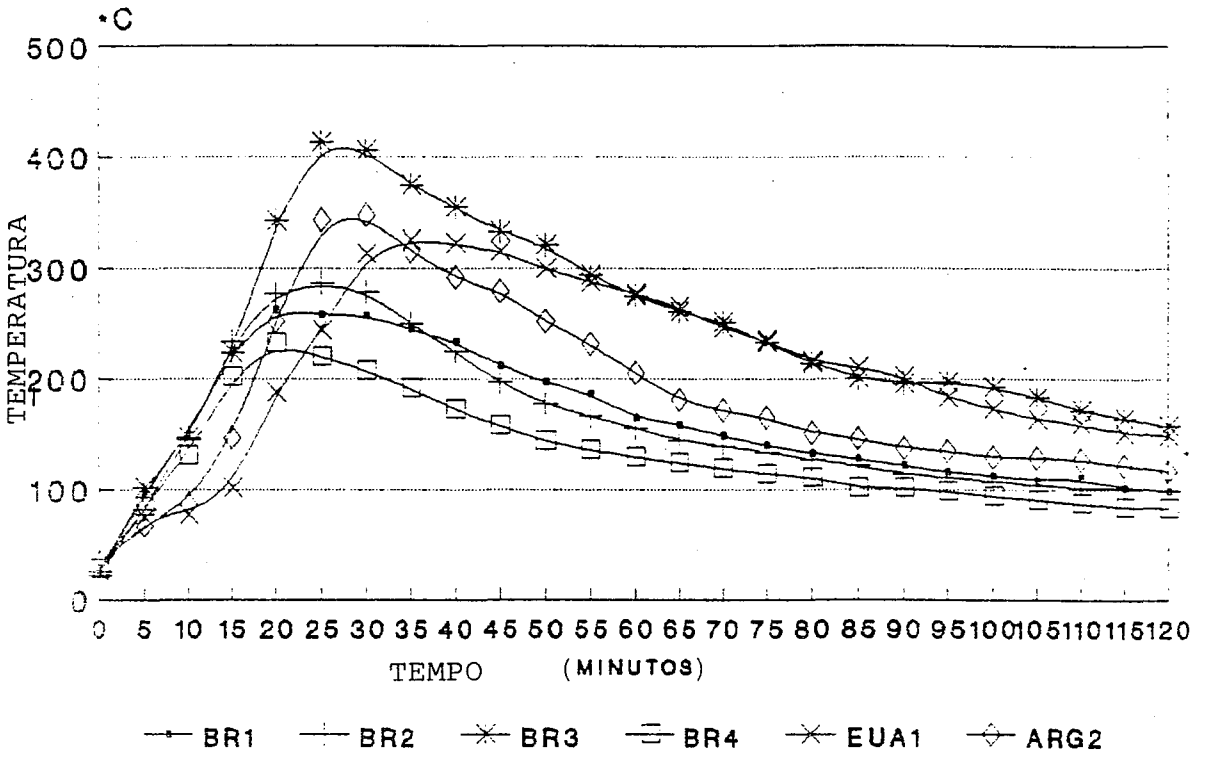


FIGURA 5. Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão.

A análise de variância da Tabela 6 comprova estatisticamente a existência de tal variação. No entanto, o tempo para alcançar a temperatura máxima não varia significativamente, independente da procedência e, consequentemente da qualidade do briquete, conforme mostra a análise da variância da Tabela 7.

TABELA 6. 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
	5	88870.5779	17774.1155	8.7704**
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 7. Análise da variância do tempo para atingir a temperatura máxima pelo teste F

	Repetições do tempo para atingir Tmax				
	1	2	3	4	5
BR1	25	20	20		
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
	5	154.16667	30.8333	0.36694 ns
Resíduo	12	1008.33333	84.0277	
Total	17	1162.5		

ns = não significativo

A Figura 6 e Tabela 8 mostram que a procedência EUA1 consome menor porcentagem de massa durante o teste de combustão, 49,68%. Alcança a terceira maior temperatura máxima e terminam o teste com a segunda maior temperatura final. Os briquetes desta procedência possuem 37,04% de cinzas (Tabela 3) na sua composição.

Os briquetes da procedência BR3, possuindo menos de 1% de cinzas(Tabela 3), apresentam a maior temperatura máxima, no entanto, consomem 73,81% da massa total, terminando o teste praticamente com a mesma temperatura do EUA1, como pode ser observado na Figura 5.

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

Para cozimento e aquecimento è interessante a manutenção de uma determinada temperatura mèdia, não sendo oportuno picos de temperatura elevada, tornando necessàrio realimentações frequentes de combustìvel, 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 calorìfico nem teor de carbono fixo elevados), o teor de cinzas deve colaborar favoravelmente na conservação do calor.

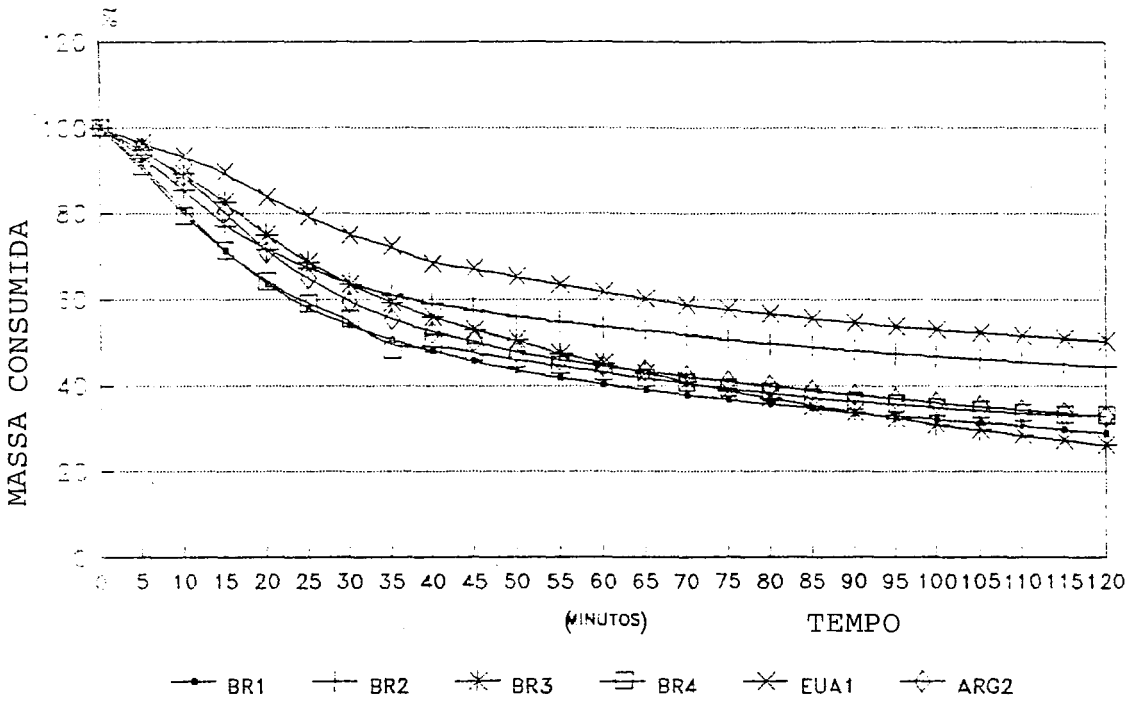


FIGURA 6. Consumo de massa durante o teste de combustão

Os briquetes da procedência EUA1 apresentam o ICOM mais elevado, 1,23 (Tabela 8), confirmando e colaborando com a hipótese dos mesmos possuirem 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 pela 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. Nesta figura,

verifica-se que a menor àrea està sob a curva do BR4, que è tambèm a procedência que apresenta o menor ICOM. Os briquetes da procedência EUA1 apresentam o maior ICOM e, a àrea sob sua curva correspondente na Figura 5 è a segunda maior.

No entanto, è necessàrio lembrar que, no càlculo 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 està 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 contra partida consumem muita massa para gerar essa energia, provavelmente o seu ICOM não serà elevado.

Um exemplo disto acontece com os briquetes da procedência ARG2, apesar de apresentarem a segunda maior temperatura màxima e a maior temperatura final, consomem bastante massa, ficando em consequência com o terceiro ICOM, como pode ser visto na Tabela 8.

TABELA 8. Indice de combustão (ICOM), temperatura maxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida atè a temperatura màxima (Tmàx) e na temperatura final (Tfinal) do teste.

Proced.	Tmàx* (°C)	Tfinal (°C)	Consumo de massa Tmax (%)	Consumo de massa Tfinal (%)	ICOM
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 as mèdias das repetições
* valores obtidos de uma curva mèdia.

Analizando o ICOM frente as propriedades fìsicas, verifica-se que o BR4 apresenta a menor massa especìfica (densidade à granel), e o EUA1 a maior

Analizando-se estatisticamente a Tabela 8, verificou-se que existe correlação estatìstica linear com r = 0.9 entre a temperatura màxima (Tmax.) e a temperatura final do teste (Tfinal). Não encontrou-se correlação estatìstica entre temperatura final e massa consumida na temperatura final, assim como, entre a temperatura màxima e consumo de massa na temperatura màxima. Isto mostra que a temperatura de combustão, depende de outros fatores alèm da

quantidade de massa consumida na combustão.

Utilizando-se o Sistema de Anàlise Estatìstica - SAS, para estudar as possìveis correlações do ICOM com as principais variàveis, encontrou-se que a maior correlação estatìstica do ICOM è com a massa especìfica (densidade à granel) atravès de uma função exponencial. Pelo teste F esta correlação è significativa ao nìvel de 0,1% de probabilidae conforme monstra a Tabela 9. A função que melhor representa esta correlação è **ICOM = exp(3,23484 + 0.00263 DGRA)** com R2 = 0.72 , mostrada na Figura 7. Esta correlação estatìstica entre ICOM e DGRA demonstra a importância da forma do briquete, diminuindo o volume de vazios na carga de combust~

TABELA 9. Análise da variância da correlação do índice de combustão (ICOM) com a densidade à granel (DGRA).

Proced.	DGRA (kg/m^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	3.427381		

** = correlação significativa ao nível de 0,1% de probabilidade

* ICOM ajustado = obtido através da equação exponencial

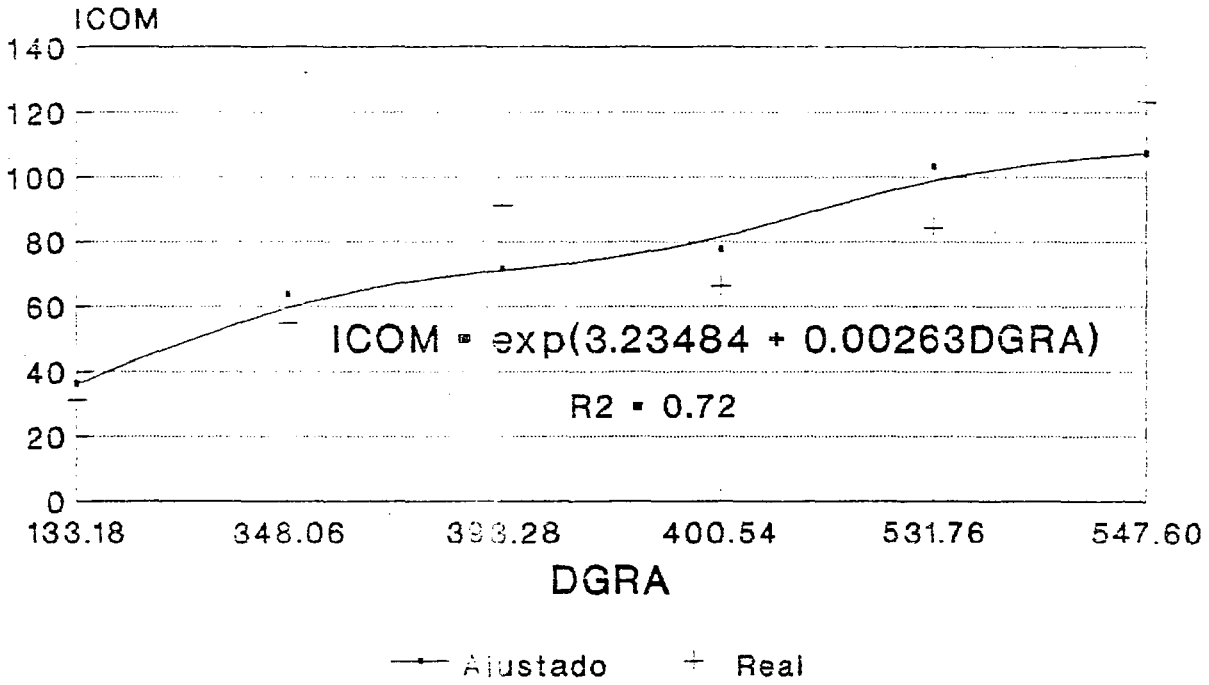


FIGURA 7. Função que melhor correlaciona o índice de combustão (ICOM) com a densidade à granel (DGRA).

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

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

5. 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 um 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 através dele, classes de qualidade de briquetes de carvão vegetal;

b. a compactação é um 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, bem como da sua forma e dimensões, com a consequente melhor ocupação dos espaços vazios na carga em combustão;

d. características tais 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 comparados com a densidade a granel;

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

f. o melhor briquete dentre todas 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, e que na classificação geral de qualidade ficou em segundo lugar, logo após o EUA1. As quatro procedências brasileiras apresentaram elevada variação de qualidade, alcançando os extremos dos valores observados para o índice de combustão.

6. REFEENCIAS BIBLIOGRAFICAS

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

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

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

BRASIL, MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energètico Nacional**. Brasilia, 1986. 136p

BRITO, J. O. & DE NUCCI, O. Estudo tecnològico da madeira de Pinus SPP para a produç"ao de carvão vegetal e briquetagem. **IPEF** Piracicaba, :25-30, abr, 1984

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.

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 tecnica 748).

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

FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; ARAKAKI, E. O. Aspectos técnicos da briquetagem de carvão vegetal no Brasil. Brasilia, LPF, 1989. 14p. (Serie Técnica, 1)

FONTES, P. J. P. de; QUIRINO, W. F.; PASTORE JR., F.; FILGUEIRAS, S. M. S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal**. Brasilia: Laboratório de Produtos Florestais/DPQ/IBDF, 1984. 8p.

GOMES, P. A. **Caracterização de briquetes de carvão vegetal para utilização domèstica**. Belo Horizonte: CETEC 1985. 28p.

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.

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

KOMAREK RESEARCH. The briquetting process/ K.R. Komarek Research._ Anniston, s.d. 38p.; ilus.

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

KULAGIN, E. P. Petroleum as binder for briquetting charcoal fines. **Sb. Tr. TNI i Prockt.** URSS Inst. Lesokhim. Prom., (21):904, 1971. (b)

KULAGIN, E. P. & TREFILOVA, V. A. Effect of roasting temperature on the properties of briquets from wood charcoal fines and from lignosulfonates. URSS. Gidroliz. Lesokhim Prom. (24):112, 1971.

KULAGIN, E. P. & PASSADINA, E. S. Dependence of charcoal briquets on the amount of binder. URSS. Gidroliz. Lesokhim. (21):1415, 1972.

MESSMAN, H. C. & TIBBETTS, T. E. **Elements of briquetting and aglomeration.** Canada; Institute for Briquetting and Aglomeration, 1977, 105p.

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.

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 tècnica 341).

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Estudos preliminares de normalização de testes de controle de qualidade do carvão vegetal. Belo Horizonte, FUNDAÇAO CENTRO TECNOLOGICO DE MINAS GERAIS. 1982

PIETSCH, W. **Roll Pressing** U.S.A.: heiden, 1976, 137p.

QUIRINO, W. F. et alii. Briquetagem de carvão vegetal e resíduos. Brasilia, Laboratòrio de Produtos florestais In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 5, Rio de Janeiro, 1987. 9p.

QUIRINO, F. Q. & DIAS, H. A. Teste de acendimento de briquetes de carvão vegetal para uso domèstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 5, Rio de Janeiro, 1986.

SALEME, J. E. F. Estudo bàsico para briquetagem do carvão vegetal. Ouro Preto, Escola de Minas e Metalurgia, s.d. 19p.

SILVA, Y. I. A. da; et alii. Briquetagem de carvões para fabricação de coque metalùrgico. **Metalurgia ABM**, São Paulo, 267(36):9599, 1980.

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.

ULHOA, M. B.; BORBA, P. E. M.; SILVA, Y. I. A. da. Emprego de carvão vegetal em coquerias através do processo de coqueificação mistura-briquete. **Metalurgia ABM**, São Paulo, 329(41):1858, 1985.

ANEXOS

EXEMPLO DE TESTE DE COMBUSTAO DO MAIOR ICOM

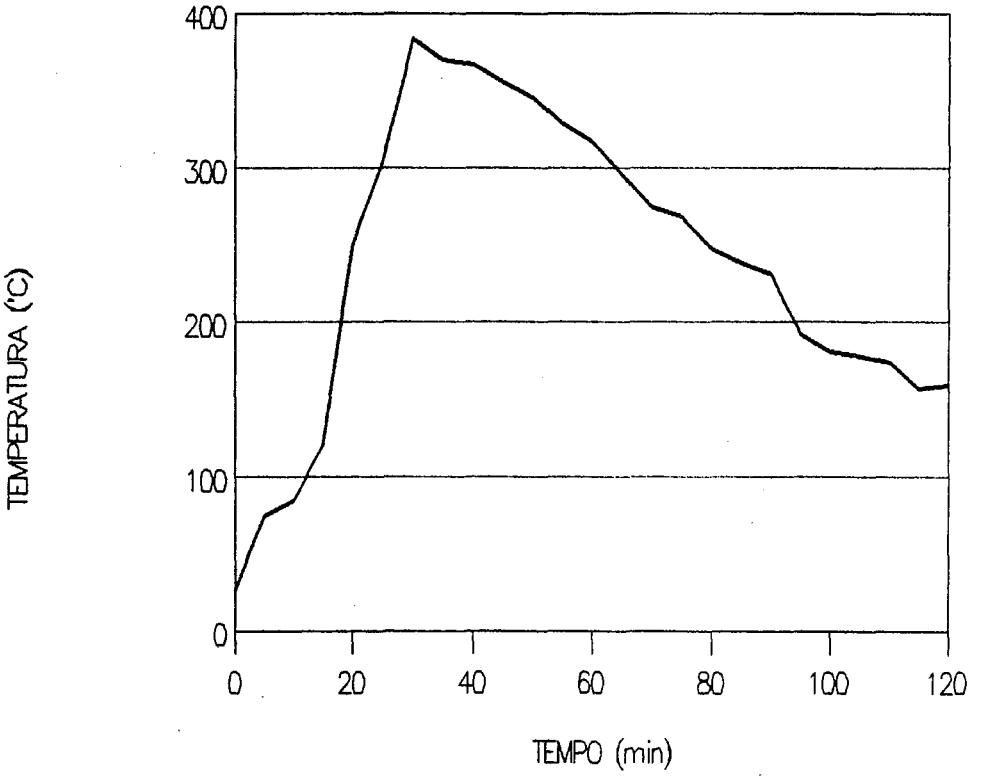
PROJETO : QUIRINO
ESPEC.: BRIQUETE - E U A 1
DATA: 30/11

TEMPO	TEMP	MASSA	%
0	26.6	609.0	100.00
5	74.8	21.5	3.53
10	84.4	42.0	6.90
15	120.1	65.5	10.76
20	250.0	102.0	16.75
25	302.0	129.0	21.18
30	384.0	157.0	25.78
35	370.0	168.5	27.67
40	367.0	189.0	31.03
45	355.0	203.5	33.42
50	345.0	214.5	35.22
55	328.0	225.5	37.03
60	317.0	236.5	38.83
65	295.0	244.5	40.15
70	274.0	255.0	41.87
75	268.0	262.0	43.02
80	247.0	268.0	44.01
85	238.0	275.0	45.16
90	231.0	282.0	46.31
95	191.9	287.5	47.21
100	181.3	292.0	47.95
105	178.0	296.0	48.60
110	173.9	300.5	49.34
115	156.8	304.5	50.00
120	159.3	308.0	50.57

OBS.: Os gráficos referentes a esta repetição estão a seguir.

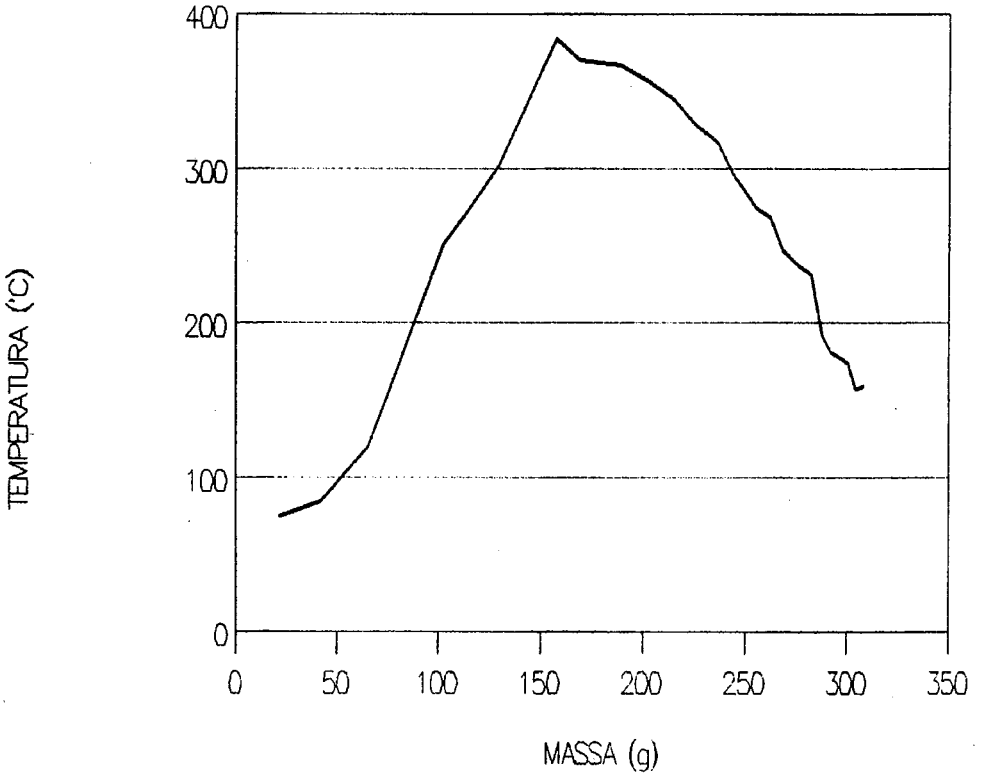
TEMPO x TEMPERATURA

PROCEDÊNCIA EUA1 - 30/11 - A



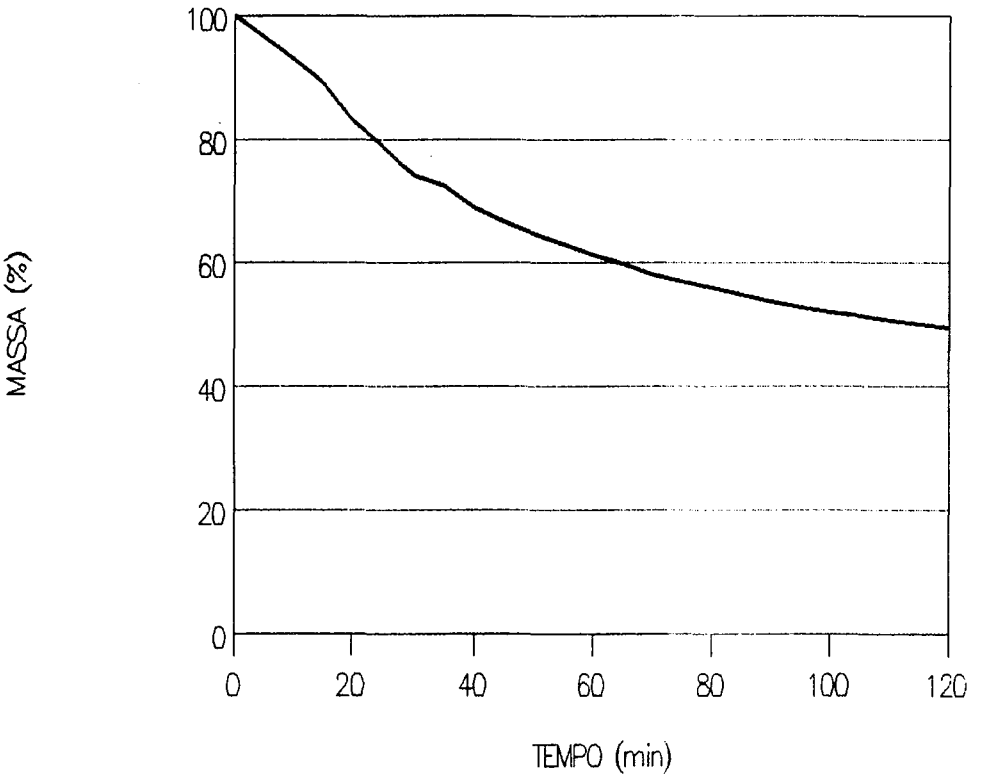
MASSA X TEMPERATURA

PROCEDÊNCIA EUA1 - 30/11 - A



MASSA(%) X TEMPO

PROCEDÊNCIA EUA1 – 30/11 – A



EXEMPLO DE TESTE DE COMBUSTÃO DE UMA REPETIÇÃO

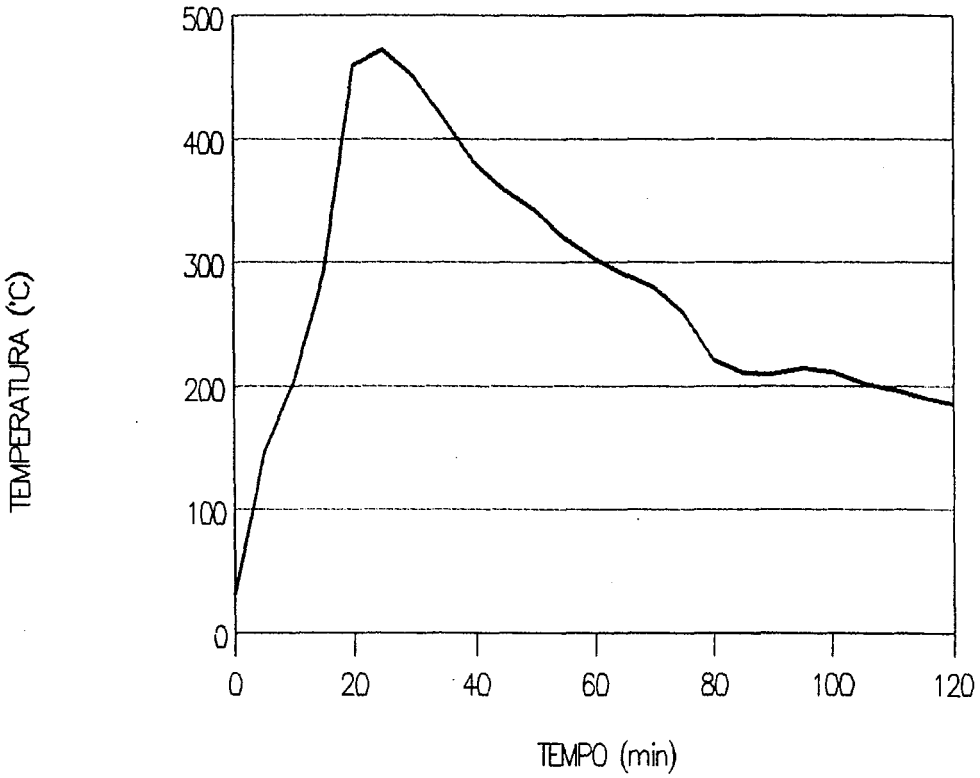
PROJETO : QUIRINO
ESPEC.: BRIQUETE - BR3
DATA: 26/11

TEMPO	TEMP	MASSA	%
0	31.6	466.0	100.00
5	146.0	25.5	5.47
10	205.0	43.5	9.33
15	292.0	68.0	14.59
20	459.0	104.0	22.32
25	472.0	134.5	28.86
30	451.0	157.0	33.69
35	415.0	178.5	38.30
40	379.0	194.5	41.74
45	358.0	210.0	45.06
50	343.0	217.0	46.57
55	320.0	238.0	51.07
60	303.0	249.0	53.43
65	291.0	261.5	56.12
70	280.0	273.0	58.58
75	260.0	284.5	61.05
80	221.0	295.0	63.30
85	211.0	306.5	65.77
90	210.0	314.0	67.38
95	215.0	322.0	69.10
100	212.0	331.5	71.14
105	202.0	338.5	72.64
110	197.1	345.0	74.03
115	190.6	353.5	75.86
120	185.7	360.5	77.36

OBS.: A seguir gráficos referentes a este teste.

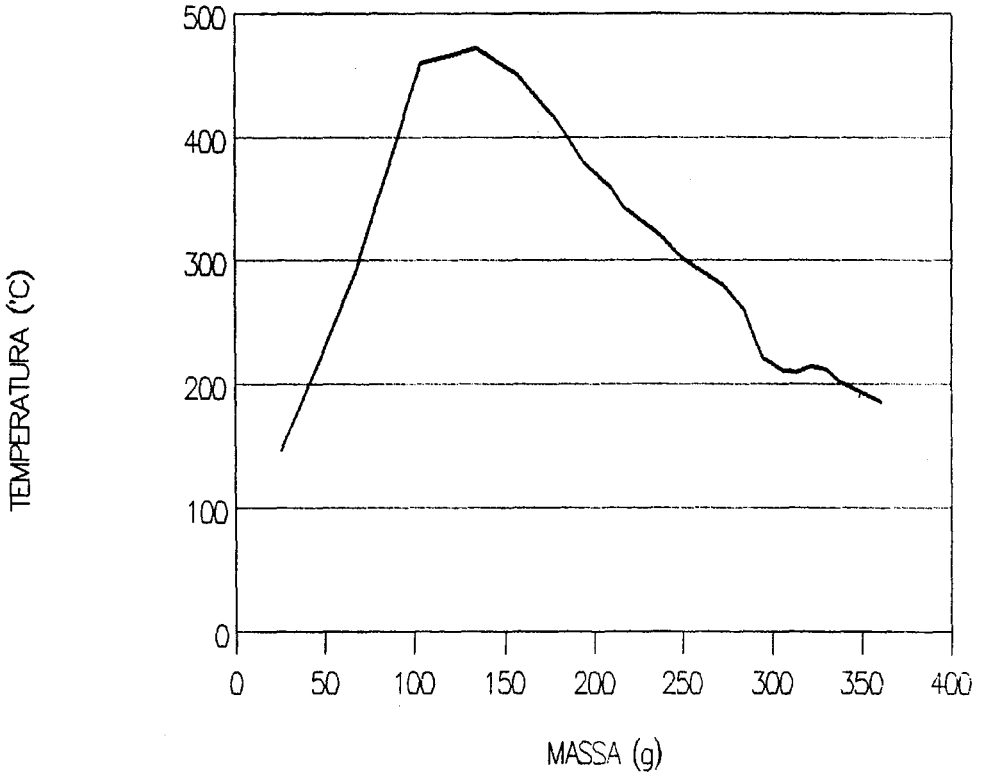
TEMPO x TEMPERATURA

PROCEDÊNCIA BR3 – 26/11 – B



MASSA X TEMPERATURA

PROCEDÊNCIA BR3 – 26/11 – B



```
*********************************************************************
*                                                                   *
*                  SAS - SISTEMA DE ANALISES ESTATISTICAS           *
*                                                                   *
*                   LABORATORIO DE METODOS QUANTITATIVOS            *
*                                                                   *
*                            LCF / ESALQ / USP                      *
*                                                                   *
*********************************************************************
```

Forward Selection Procedure for Dependent Variable LICOM

Step 1 Variable DGRA Entered R-square = 0.72134838 C(p) = 11.86400974

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Prob>F
Regression	1	2.47233631	2.47233631	38.83	0.0001
Error	15	0.95504547	0.06366970		
Total	16	3.42738178			

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II Sum of Squares	F	Prob>F
INTERCEP	3.23484066	0.16427488	24.68858726	387.76	0.0001
DGRA	0.00263169	0.00042233	2.47233631	38.83	0.0001

Bounds on condition number: 1, 1

Step 2 Variable UMI Entered R-square = 0.79659131 C(p) = 7.15010363

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F	Prob>F
Regression	2	2.73022254	1.36511127	27.41	0.0001
Error	14	0.69715924	0.04979709		
Total	16	3.42738178			

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II Sum of Squares	F	Prob>F
INTERCEP	4.22083120	0.45698033	4.24819962	85.31	0.0001
DGRA	0.00245732	0.00038127	2.06848430	41.54	0.0001
UMI	-0.12814816	0.05631191	0.25788623	5.18	0.0391

Bounds on condition number: 1.042092, 4.168368

Summary of Forward Selection Procedure for Dependent Variable LICOM

Step	Variable Entered	Number In	Partial R**2	Model R**2	C(p)	F	Prob>F
1	DGRA	1	0.7213	0.7213	11.8640	38.8307	0.0001
2	UMI	2	0.0752	0.7966	7.1501	5.1787	0.0391
3	CINZA	3	0.0462	0.8428	5.0267	3.8216	0.0724
4	DRA	4	0.0407	0.8835	3.3920	4.1971	0.0630
5	MVOL	5	0.0148	0.8984	4.0678	1.6064	0.2312