

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Campus Sorocaba

ANDRÉ JULIANO FRANCO

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSIÇÕES DE COQUE E
FIBRAS VEGETAIS (BAGAÇO DE CANA E MADEIRA) PARA
APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES.**

Sorocaba
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Campus Sorocaba

ANDRÉ JULIANO FRANCO

**ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSIÇÕES DE COQUE E
FIBRAS VEGETAIS (BAGAÇO DE CANA E MADEIRA) PARA
APLICAÇÃO NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES.**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, para obtenção do título de mestre em Ciências dos Materiais.

Orientação: Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Co-Orientação: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji

Sorocaba
2011

[*VERSO DA FOLHA DE ROSTO*]

Franco, André Juliano
F825e Estudo e Caracterização de composições de Coque e Fibras Vegetais
(Bagaço de Cana e Madeira) Para Aplicação na Produção de Briquetes /
André Juliano Franco. -- Sorocaba, 2011
00 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, *Campus*
Sorocaba, 2011
Orientador: Jane Maria Faulstich de Paiva
Banca examinadora: Sandro Donnini Mancini, Vagner Roberto Botaro
Bibliografia

1. Biomassa. 2. Briquetes. 3. Coque. 4. Fibras vegetaisI. Título. II.
Sorocaba-Universidade Federal de São Carlos.

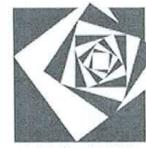
CDD 662.88

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do *Campus* de Sorocaba.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS DE SOROCABA**

Rodovia João Leme dos Santos, km 110
Bairro Itinga
Telefone: (15) 3229-6000
CEP 18052-780 - Sorocaba - São Paulo - Brasil
<http://www.ppgcm.ufscar.br/> : ppgcm@ufscar.br



Pós-Graduação UFSCar
multiplicando conhecimento

ATA GERAL DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ANDRÉ JULIANO FRANCO DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS, CURSO DE MESTRADO, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – CAMPUS SOROCABA.

Aos vinte e cinco dias do mês de fevereiro de 2011, às 09:30h no Laboratório de Física da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, reuni-se a comissão Examinadora composta pelos seguintes membros: Prof^a. Dr^a. Jane Maria Faulstich de Paiva, da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, campus Sorocaba, Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro, da Universidade Federal de São Carlos/campus Sorocaba, sob a presidência do primeiro, para a Defesa de Dissertação de Mestrado do discente **ANDRÉ JULIANO FRANCO**, intitulada: “**Estudo e caracterização de composições de coque e fibras vegetais (bagaço de cana e madeira) para aplicação na produção de briquetes**”, de acordo com o regulamento do Programa, tendo o(a) candidato(a) recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof^a. Dr^a. JANE MARIA FAULSTICH DE PAIVA



Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI



Prof. Dr. VAGNER ROBERTO BOTARO

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Ana Paula pelo apoio, compreensão e incentivo.

AGRADECIMENTO

A minha orientadora Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva pela confiança, apoio, amizade e suporte para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji pela co-orientação. A todos os professores do PPGCM / UFSCar, Campus de Sorocaba/SP, pela dedicação ao ensino.

Ao técnico de laboratório João Lúcio pela grande ajuda na realização dos ensaios de compressão diametral e também pela sua amizade.

Ao Mestrando Walbert Chrisostomo pelo apoio e ajuda durante a realização da parte prática deste trabalho e principalmente por sua grande amizade.

Aos meus pais, Maria José e Reinaldo, pois sem eles eu não chegaria até aqui nunca.

A Unimetal, Indústria, Comércio e Empreendimentos por ceder o coque de petróleo utilizado neste trabalho e por disponibilizar equipamentos para a realização das análises de poder calorífico.

Ao meu gerente, Marcos Moreno, por ter suportado minha ausência na empresa durante o período de cumprimento de disciplinas.

Aos colegas da Iniciação Científica do Grupo de Pesquisa Biomassa e Bioenergia pelos trabalhos realizados.

À Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Campus Sorocaba/SP e ao Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais, pela oportunidade.

RESUMO

O coque “verde” de petróleo é um produto sólido, obtido a partir do craqueamento de óleos residuais pesados em unidades de conversão de resíduos denominadas unidades de coqueamento retardado (UCR). O mercado de aplicação do coque “verde” é vasto, com grande potencial de utilização industrial, como na área metalúrgica (carburante ou redutor), obtenção de cadinhos refratários, peças sinterizadas, revestimentos de equipamentos, composição de vidro âmbar, combustíveis sólidos. Devido ao seu alto poder calorífico, 8200 a 8600 kcal/kg, este subproduto do petróleo é amplamente utilizado como fonte geradora de energia em indústrias. O presente trabalho teve como objetivo a mistura de finos de coque de petróleo com fibras vegetais (de eucalipto e de bagaço de cana) e posterior obtenção de briquetes através de moldagem por compressão. Desta maneira, esperava-se obter um produto com maior poder calorífico em comparação com briquetes formados somente por fibras vegetais e, adicionalmente, reduzir em parte o consumo de materiais de fontes não renováveis (coque de petróleo) na obtenção de briquetes. As proporções em massa das misturas de finos de coque de petróleo e fibra vegetal foram: 100% finos de coque, 75/25, 50/50, 25/75 e 100% fibra vegetal. As misturas tiveram suas umidades padronizadas entre 10% e 12% e a força utilizada para a compactação foi de 12t. Para proceder a compactação utilizou-se um molde de aço inoxidável, em formato cilíndrico, com área de $9,62\text{cm}^2$, e uma prensa hidráulica tipo placas paralelas. Os briquetes moldados com a proporção 25/75 e 50/50 coque/fibras apresentaram, visualmente, boa aglomeração e adequada compactação. Obteve-se, também, a formação de briquetes compostos de 100% de coque de petróleo, porém estes apresentaram-se frágeis. No entanto, para as misturas 75/25 coque/fibras não foi possível a obtenção dos briquetes, provavelmente, devido à compactação não adequada. Amostras de todos os briquetes produzidos foram submetidas à análise de poder calorífico superior (PCS). Os briquetes de composição 50/50 coque/eucalipto e coque/bagaço apresentaram aumento de aproximadamente 50% nos valores de PCS quando comparados aos valores encontrados para os briquetes compostos de 100% de fibras vegetais. Realizou-se ensaios de compressão diametral para os briquetes e a maioria dos briquetes apresentou características de materiais relativamente frágeis com baixos valores de deformação. Os briquetes de composição 100% coque de petróleo foram os que apresentaram os menores valores de tensão e deformação. Para os briquetes de composição coque/eucalipto foi observado o comportamento decrescente para as variáveis força, deformação e tensão conforme a concentração de coque aumentava. Já

para as composições coque/bagaço de cana de açúcar, ocorreram aumentos nos valores das variáveis quando da adição de coque.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

"Green" petroleum coke is a solid product, obtained from the cracking of heavy residual oils in the waste conversion units called delayed coking units (UCR). The market for application of "green" coke is very broad, perhaps regarded as the product (derived directly from oil) with the greatest potential for industrial use, as in the metallurgical area (fuel or reducer), obtaining refractory crucibles, sintered parts, coating equipment, composition of amber glass, solid fuels. Due to its high calorific value, from 8200 to 8600 kcal/kg, this byproduct of oil is widely used as a source of energy in industries. This study aimed to the blending of petroleum coke fines with natural fibers (eucalyptus and sugarcane bagasse) and subsequently obtains briquettes through compression molding. Thus, it was hoped to obtain a product with a higher calorific value compared with briquettes formed only by vegetable fibers and additionally reduce partly the consumption of materials from non-renewable sources (petroleum coke) to obtain briquettes. The raw materials used were fines of petroleum coke and eucalyptus fibers and sugarcane bagasse .. The proportions of mixtures of fines of petroleum coke and vegetable fibers were: 100% coke fines, 75/25, 50/50, 25/75 and 100% vegetable fibers. The mixtures had their moisture standardized between 10% and 12% and the force used to perform the compaction was 12t. To make the compression it was used a cylindrical stainless steel cast of 9.62 cm² and a hydraulic press of parallel plates type. The briquettes molded with the ratio 25/75 and 50/50 coke/fibers presented, visually, good compaction and proper agglomeration. It was obtained also the formation of briquettes made of 100% petroleum coke, but they presented themselves fragile. However, for blends 75/25 coke/fibers was not possible to obtain briquettes, probably due to compaction is not adequate. Samples of all produced briquettes were analyzed for gross calorific value (GCV). The briquettes compounded of 50/50 coke/eucalyptus and coke/bagasse showed an increase of approximately 50% in the GCV when compared to those found for the briquettes made from 100% plant fibers. It was done diametral compression tests for the briquettes and most of them showed characteristics of relatively brittle materials with low strain values. The briquettes compounded of 100% petroleum coke showed the lowest values of stress and strain. For the briquettes compounded of coke/ eucalyptus was observed decreasing behavior of the variables as the concentration of coke increased. For the briquettes compounded of coke/sugar cane bagasse, occurred an increase in the values of variables after the addition of coke.

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Diagrama de fluxo do processo de coqueamento retardado	2
1.2 - Tela principal do software TruSpec S	11
1.3 - Calorímetro modelo C2000 marca IKA	12
1.4 - Bomba calorimétrica C500 em corte e seus componentes	12
1.5 - Montagem do fio de algodão	13
1.6 - Fio em contato com a amostra	13
2.1 - Estrutura química da celobiose	16
2.2 - Estrutura da lignina proposta por Nimz em 1974	17
2.3 - Fórmulas estruturais dos açúcares das hemiceluloses	18
2.4 - Conjunto prensa hidráulica e molde utilizado na compactação	25
2.5 - Briquetes com composições de coque e fibras de eucalipto	26
2.6 - Briquetes com composições de coque e fibras de cana de açúcar	26
2.7 - Briquetes com baixa compactação	27
3.1 - Bomba calorimétrica adiabática	33
3.2 - PCS briquetes coque/fibra de eucalipto: prático e calculado	35
3.3 - PCS briquetes coque/fibra de bagaço: prático e calculado	35
4.1 - Representação do corpo de prova durante ensaio de compressão diametral	39
4.2 - Fotografia do ensaio de resistência a compressão diametral	40
4.3 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 100% bagaço	41
4.4 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 100% coque	41
4.5 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 100% eucalipto	42
4.6 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 50/50 – coque/ bagaço	42
4.7 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 25/75 – coque/ bagaço	43
4.8 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 50/50 – coque/ eucalipto	43
4.9 - Ensaio de resistência a compressão diametral: 25/75 – coque/ eucalipto	44
4.10 - Comparativo dos resultados de força máxima entre composições de briquetes	49
4.11 - Comparativo dos resultados de deformação máxima entre composições de briquetes	49
4.12 - Comparativo dos resultados de tensão máxima entre composições de briquetes	50

LISTA DE TABELAS

1.1 - Especificação de controle para coque verde de petróleo	4
1.2 - Valores médios da caracterização química de coque	14
1.3 - Curva granulométrica do coque verde seco	14
2.1 - Composição média de diferentes tipos de materiais ligno-celulósicos	20
2.2 - Valores de umidade para as misturas pré compactação	27
3.1 - Poder calorífico superior (PCS)	34
3.2 - Poderes caloríficos superiores (prático e calculado)	34
4.1 - Resultados compressão diametral briquete 100% eucalipto	44
4.2 - Resultados compressão diametral briquete 25/75 coque/eucalipto	45
4.3 - Resultados compressão diametral briquete 50/50 coque/eucalipto	45
4.4 - Resultados compressão diametral briquete 100% bagaço	45
4.5 - Resultados compressão diametral briquete 25/75 coque/bagaço	46
4.6 - Resultados compressão diametral briquete 50/50 coque/bagaço	46
4.7 - Resultados compressão diametral briquete 100% coque	46
4.8 - Resultados médios compressão diametral para composições de briquetes	48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Xg - Massa de material retido (g)

Yg - Massa total de material (g)

CZ - Teor de cinzas (%)

C - Massa do cadinho de platina (g)

C+A - Massa do cadinho de platina + Amostra (g)

C+R - Massa do cadinho de platina + Resíduo após queima (g)

MV1Q - Teor de material volátil com uma queima (%)

C+A - Massa do cadinho de platina + amostra (g)

P1 - Massa do cadinho de platina + amostra com uma queima (g)

MV2Q - Teor de material volátil com duas queimas (%)

P2 - Massa do cadinho de platina + amostra após segunda queima (g)

CF - Teor de carbono fixo (%)

MV - Teor de material volátil (%)

PCS - Poder Calorífico Superior

PCI - Poder Calorífico Inferior

dU - Variação de energia

dq - Variação da quantidade de calor

dw_{exp} - Trabalho de expansão

dw_e - Trabalho externo

ΔU - Variação de energia

q_v - Quantidade de calor a volume constante

C - Capacidade calorífica

ΔT - Variação de temperatura

T - Resistência de tração

P - Carga de ruptura

L - Comprimento do corpo de prova

D - Diâmetro do corpo de prova

π - Proporção numérica entre perímetro e diâmetro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DO COQUE VERDE DE PETRÓLEO	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 EXPERIMENTAL.....	4
1.2.1 Preparação da Amostra	4
1.2.2 Determinação da Granulometria	5
1.2.3 Determinação da Umidade	6
1.2.4 Determinação de Cinzas	6
1.2.5 Determinação de Material Volátil	7
1.2.6 Determinação de Carbono Fixo	9
1.2.7 Determinação de Enxofre	10
1.2.8 Determinação do Poder Calorífico	11
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
1.4 REFERÊNCIAS	15
CAPÍTULO 2 – PREPARAÇÃO DE BRIQUETES DE COMPOSIÇÕES DE COQUE DE PETRÓLEO E FIBRAS VEGETAIS	16
2.1 INTRODUÇÃO	16
2.1.1 A biomassa	16
2.1.2 Utilização da biomassa	19
2.1.3 O processo de briquetagem	22
2.2 EXPERIMENTAL	24
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
2.4 REFERÊNCIAS	29
CAPÍTULO 3 – DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS BRIQUETES DE COMPOSIÇÃO DE COQUE DE PETRÓLEO E FIBRAS VEGETAIS	31
3.1 INTRODUÇÃO	31
3.2 EXPERIMENTAL	33
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
3.4 REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO 4 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS BRIQUETES DE COMPOSIÇÕES DE COQUE DE PETRÓLEO E FIBRAS VEGETAIS	38
4.1 INTRODUÇÃO	38
4.2 EXPERIMENTAL	39
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.4 REFERÊNCIAS	51
CONCLUSÕES	52
TRABALHO APRESENTADO EM CONGRESSO	53
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53

Capítulo 1 – Caracterização do Coque Verde de Petróleo

1.1 Introdução

Szklo (2005) define petróleo como uma substância oleosa, inflamável, com cor variando entre a negra e a castanho-claro.

Os principais constituintes do petróleo, segundo Gomide (1979), são os hidrocarbonetos parafínicos (C_nH_{2n+2}), os naftênicos (C_nH_{2n}), os aromáticos e os materiais asfálticos. No petróleo cru ou cru de petróleo, praticamente não há hidrocarbonetos insaturados.

De acordo com Janssen e Roussel (1991), o coque de petróleo é um sólido escuro composto de carbono, produzido a partir da decomposição térmica e polimerização de hidrocarbonetos líquidos pesados derivados do óleo cru.

Segundo Mantell e Tosta (1968, 2008) do ponto de vista físico, todo coque, inclusive o coque de petróleo, é essencialmente um sistema disperso composto de diminutos cristalitos embebidos em uma matriz de compostos aromáticos altamente condensados. Ainda, conforme Tosta (2008), o coque de petróleo é uma mistura de carvão e hidrocarbonetos pesados constituídos de 88-95% carbono, 3-4% hidrogênio, 1-2% nitrogênio, 0,58-6% enxofre e 1-7% oxigênio, quimicamente estável e inerte sob condições normais.

Dependendo do processo utilizado para sua produção, o coque de petróleo pode apresentar três estruturas diferentes: *shot*, esponja e agulha. O coque de petróleo produzido pelas unidades refinadoras da Petrobrás e matéria-prima utilizada neste trabalho é do tipo esponja, sendo produzido em uma Unidade de Coqueamento Retardado (Figura 1.1).

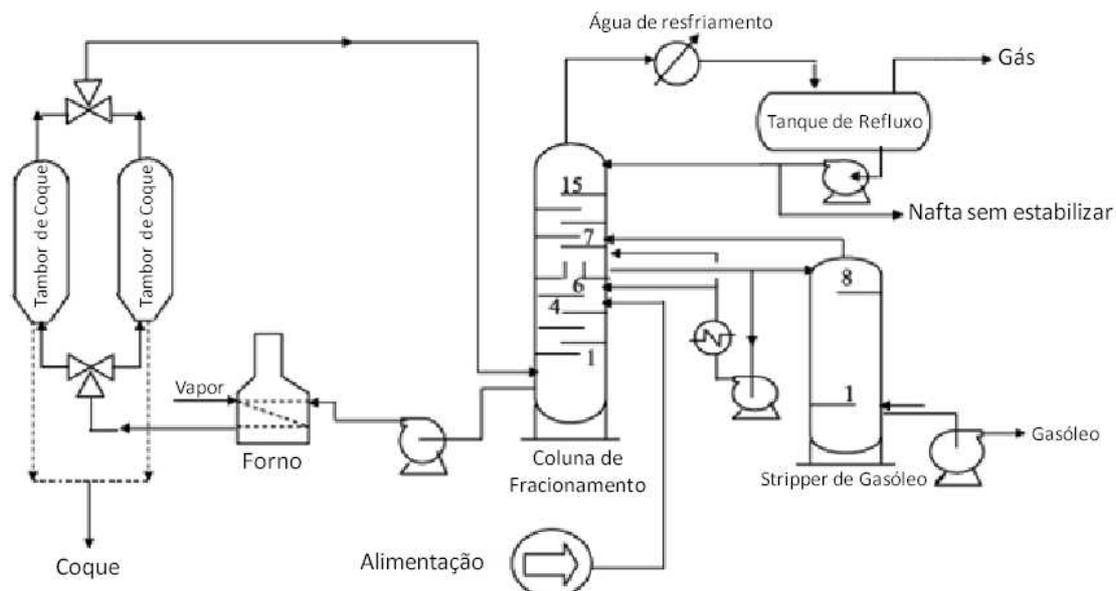


Figura 1.1. – Diagrama de fluxo do processo de coqueamento retardado
(SAWAKAR et al., 2007).

A carga é alimentada diretamente no fundo da coluna de fracionamento, onde é aquecida e as frações leves são removidas como correntes laterais. Os fundos e o reciclo provenientes da coluna de fracionamento são aquecidos em um forno cuja temperatura de saída varia de 480 a 515°C e a pressão de 0,1 a 0,4 MPa. O produto aquecido entra em um dos pares de tambores de coque, onde seguem as reações de coqueamento. Os produtos craqueados saem como uma corrente de topo e os depósitos de coque se formam no interior do tambor. Para poder se realizar uma operação contínua são usados dois tambores para cada forno, enquanto um está alinhado ao processo, o outro fica em processo de descoqueamento. O tempo de enchimento gira em torno de 24 horas e a velocidade de formação de coque gira em torno de 0,6 m/h, mas depende da velocidade espacial no interior dos tambores. Este material, devido às temperaturas de operação, é completamente carbonizado e desenvolve canais preferenciais, através dos quais o líquido e os gases podem passar e seguir o caminho para a fracionadora principal, onde são separados os gases (propano, propeno, butano, buteno) e a nafta, que precisa de mais uma operação para a estabilização (HERNÁNDEZ, 2009).

O coque formado dentro dos tambores é removido mediante o seguinte procedimento (SAWAKAR et al., 2007, SPEIGHT, 2006):

- Os depósitos de coque são resfriados com água;
- Uma das cabeças dos tambores é removida para permitir a perfuração de um buraco através do centro do depósito;
- Um dispositivo hidráulico de corte, o qual utiliza múltiplos jatos de água à alta pressão, é inserido dentro do buraco e o coque úmido é removido do tambor.

O mercado de aplicação do coque verde de petróleo é muito vasto, constituindo-se em um produto derivado direto do petróleo com grande potencial de utilização industrial, como na área metalúrgica (carburante ou redutor), obtenção de cadinhos refratários, peças sinterizadas, revestimentos de equipamentos, composição de vidro âmbar, combustíveis sólidos, obtenção de briquetes (briquetagem), entre outras possíveis aplicações. Devido ao seu alto poder calorífico, 8200 a 8600 kcal.kg⁻¹, este subproduto do petróleo é amplamente utilizado como fonte geradora de energia em indústrias.

Em indústrias de cerâmicas vermelha, o coque pode ser usado como combustível de fornos, em substituição à lenha. Sendo necessário seu peneiramento e separação da parte mais grossa, acima de 20 milímetros, misturado diretamente na fornalha para substituir a lenha. Outro uso vantajoso para o coque é a possibilidade de geração de eletricidade nas usinas de açúcar, ao ser misturado ao bagaço de cana, pois o bagaço tem vida útil curta, pois queima rapidamente, mas utilizando-se a composição com coque, pode-se manter a usina operando por mais tempo (CAMARGO, et al., 2006).

Na tabela 1.1 encontram-se as especificações para os parâmetros de controle exigidos para o coque verde de petróleo utilizado para geração de energia (queima). Dentre as vantagens da utilização do coque verde de petróleo para queima estão os baixos valores de cinzas e enxofre, além de seu alto poder calorífico. Os dois primeiros contribuem, respectivamente, para a baixa geração de resíduos e menor

emissão de poluentes. Já o terceiro garante alta geração de energia durante a queima.

Tabela 1.1 – Especificação de controle para o coque verde petróleo utilizado para queima (UNIMETAL, 2011)

Parâmetro de Controle	Especificação
Cinzas	$\leq 1,00\%$
Materiais Voláteis	$\leq 11,00\%$
Carbono Fixo	$\geq 88,00\%$
Umidade	$\leq 10,00\%$
Enxofre	$\leq 1,00\%$
Poder Calorífico Inferior	$\geq 8.200\text{kcal.kg}^{-1}$

1.2 Experimental

1.2.1 – Preparação das Amostras

O material utilizado para as análises foi o coque verde de petróleo seco classificado em uma faixa granulométrica de 0 a 5 mesh. Este material foi cedido pela Unimetal Indústria Comércio e Empreendimentos sob o nome comercial de Unicarbo CVP BTE S.

Para a homogeneização do material foi utilizado um quarteador de amostras tipo “Jones” com 16 canais e três caixas de retenção.

Encheu-se totalmente a caixa de retenção com a amostra, usando todo o seu conteúdo.

Despejou-se o conteúdo da caixa de retenção no quarteador de maneira a obter uma vazão do produto uniformemente distribuída pelo centro das calhas do mesmo.

Escolheu-se uma das caixas que estão no quarteador e realimentou-se o mesmo, colocando antes a caixa vazia no lugar da qual foi retirada.

Repetiu-se a ação anterior até que se obteve a quantidade de 200g de material para a análise.

Metade desta amostra quarteada foi utilizada para a realização de análises de granulometria e umidade. A outra metade foi pulverizada em um moinho de panelas para que ficasse 100% passante em uma peneira de 200 mesh. Posteriormente, esta foi seca completamente em um analisador de umidade de infravermelho (MB35 Halogen, marca Ohaus) a uma temperatura de 110°C. Esta metade foi, então, utilizada para a determinação de cinzas, material volátil, carbono fixo, enxofre e poder calorífico.

1.2.2 – Determinação de granulometria

Para a determinação da curva granulométrica do coque verde de petróleo classificado de 0 a 5 mesh foi utilizado como referência a norma “NBR 8629 – Carvão Mineral – Análise Granulométrica”.

Selecionou-se um conjunto de peneiras granulométricas constituído por peneiras com aberturas de 5 mesh, 7 mesh, 16 mesh e panela de retenção. Utilizando-se de uma balança (modelo ARA520, marca OHAUS) pesou-se 100g de amostra de coque verde de petróleo seco classificado de 0 a 5 mesh que, posteriormente, foi adicionada ao jogo de peneiras granulométricas.

Prendeu-se o conjunto de peneiras granulométricas e amostra a uma base vibratória (capacidade para 6 peneiras, marca Bertel), ligou-se o equipamento e deixou-se o conjunto sob vibração durante 10 minutos.

Decorridos 10 minutos, retirou-se o conjunto de peneiras granulométricas da base vibratória e realizou-se a pesagem do material retido em cada uma das peneiras contida no conjunto.

Posteriormente realizou-se o cálculo da porcentagem de retenção conforme equação 1.1

$$\% \text{ RETIDO} = X_g / Y_g \times 100 \quad (1.1)$$

Onde:

Xg = Massa de material retido (g)

Yg = Massa total de material (g)

100 = Fator de conversão para porcentagem

1.2.3 – Determinação de Umidade

Para a determinação de umidade foi utilizado um analisador halogênio de umidade, modelo MB35 da marca Ohaus.

Antes de iniciar a análise, utilizou-se a tecla “SELECT” e a tecla $\uparrow\downarrow$ para selecionar o modo automático e a temperatura de análise que foi de 105°C.

Acionou-se a tecla “TARE” para zerar a balança e pesou-se entre 5 e 10g de amostra. Fechou-se a tampa do analisador e pressionou-se a tecla “START”. Aguardou-se o sinal sonoro de fim de análise e anotou-se a porcentagem de umidade diretamente do visor do equipamento.

Pesou-se no mínimo 3 g da amostra preparada na balança. Esperou-se o equipamento estabilizar.

Fechou-se a parte superior da balança e selecionou-se a tecla “START”. Aguardou-se o sinal sonoro para ler o resultado no visor da balança, mostrado em porcentagem.

1.2.4 – Determinação de Cinzas

Para a determinação da porcentagem de cinzas foi utilizado como referência a norma “NBR 9092 – Coque – Determinação de Teor de Cinzas”.

Pesou-se um cadinho de platina previamente calcinado e anotou-se o peso como “C”.

Utilizando-se do cadinho previamente tarado e de uma balança analítica (modelo AR2140, marca OHAUS), pesou-se 1,0000g +/- 0,1000g de anotando-se a massa como “C+A”.

Com o auxílio de uma pinça, levou-se o cadinho com a amostra para um forno mufla (modelo Q318M, marca Quimis) a uma temperatura de 950°C +/- 20°C, onde o conjunto cadinho amostra permaneceu durante 4 horas.

Posteriormente, o cadinho de platina foi retirado do forno mufla e transferido para um dessecador condicionado a vácuo, onde foi deixado até que atingisse a temperatura ambiente.

Procedeu-se a pesagem do cadinho de platina e anotou-se o valor como “C + A(CAL)”.

Utilizou-se, então, da equação 1.2 para o cálculo da porcentagem de cinzas:

$$\%CZ = \frac{((C+A) - (C+A(CAL))) \times 100}{100} \quad (1.2)$$

Onde:

CZ = Teor de cinzas (%)

C = Massa do cadinho de platina (g)

C+A = Massa do cadinho de platina + Amostra (g)

C+A (CAL) = Massa do cadinho de platina + Amostra após queima (g)

1.2.5 – Determinação de Material Volátil

Para a determinação da porcentagem de material volátil foi utilizado como referência a norma “Standard Method 319-54 – Determination of Volatile Matter in Petroleum Coke”.

Pesou-se um cadinho de platina com tampa e orifício central previamente seco e anotou-se o valor como “C”.

Utilizando-se do cadinho de platina previamente tarado e de uma balança analítica (modelo AR2140, marca OHAUS), pesou-se 1,0000g +/- 0,1000g de amostra anotando a massa como “C + A” .

Colocou-se a tampa no cadinho de maneira que esta ficasse bastante justa às bordas.

Com o auxílio de uma pinça, levou-se o cadinho com a amostra a um forno mufla (modelo Q318M, marca Quimis), certificando-se de que a temperatura interna estivesse a 950°C +/- 20°C.

Assim que se colocou o cadinho no interior do forno mufla acionou-se, o mais rápido possível, um cronômetro e deixou-se o processo de queima ocorrer durante 7 minutos.

Decorridos os 7 minutos, retirou-se o cadinho do forno mufla que foi colocado em um dessecador condicionado a vácuo. Deixou, então, o cadinho no dessecador até que o mesmo atingisse a temperatura ambiente.

Finalmente, pesou-se o cadinho contendo o resíduo em balança analítica, anotando como “P1”. Utilizou-se a equação 1.3 para o cálculo.

$$\text{MV1Q} = \frac{((C+A) - P1) \times 100}{100} \quad (1.3)$$

Onde:

MV1Q = Teor de material volátil com uma queima (%)

C = Massa do cadinho de platina (g)

C+A = Massa do cadinho de platina + amostra (g)

P1 = Massa do cadinho de platina + amostra após primeira queima (g)

100 = Fator de conversão para porcentagem

Realizou-se, então, uma segunda queima para o mesmo cadinho repetindo o procedimento acima a partir da inserção do mesmo no forno mufla. Anotou-se o novo peso como “P2”, e utilizou-se da equação a 1.4 para o cálculo.

$$\mathbf{MV2Q} = \frac{(P1 - P2) \times 100}{((C+A) - C)} \quad (1.4)$$

Onde:

MV2Q = Teor de material volátil com duas queimas (%)

C = Massa do cadinho de platina (g)

C+A = Massa do cadinho de platina + amostra (g)

P1 = Massa do cadinho de platina + amostra após primeira queima (g)

P2 = Massa do cadinho de platina + amostra após segunda queima (g)

100 = Fator de conversão para porcentagem

1.2.6 – Determinação de Carbono Fixo

Para a determinação da porcentagem de material volátil foi utilizado como referência a norma “NBR 9102 – Cálculo do Teor de Carbono Fixo em Coque”.

A porcentagem de carbono fixo contido no coque verde de petróleo é obtida através de cálculo após a obtenção das porcentagens de material volátil e cinzas, conforme mostrado na equação 1.5.

$$\mathbf{CF} = 100 - (MV + CZ) \quad (1.5)$$

Onde:

CF = Teor de carbono fixo (%)

100 = Porcentagem total

MV = Teor de material volátil (%)

CZ = Teor de cinzas (%)

1.2.7 – Determinação de Enxofre

Para realização das análises foram utilizados um analisador elementar modelo Truspec da marca Leco e um padrão de carvão (Coal PROX-X IARM HC-30025B), também da marca Leco, para padronização do equipamento.

Após a padronização do equipamento, pesou-se em uma navícula (recipiente de cerâmica) uma massa de 0,1000g a 0,2000g de coque verde de petróleo seco pulverizado. Acessou-se o software TruSpec S onde foram inseridos dados como a identificação da amostra, massa de amostra e método utilizado. Posteriormente, a amostra foi inserida dentro do tubo de combustão do analisador elementar que se encontrava a 1.350°C e foi acionado o comando para que o equipamento iniciasse a análise. Após a queima completa da amostra de coque verde de petróleo seco e pulverizado, os gases foram captados pelo equipamento e a quantidade de enxofre foi determinada utilizando-se uma célula de infravermelho.

O resultado foi obtido em porcentagem, diretamente na tela principal do software TruSpec S, que gerencia o analisador elementar, conforme pode ser visto na Figura 1.2.

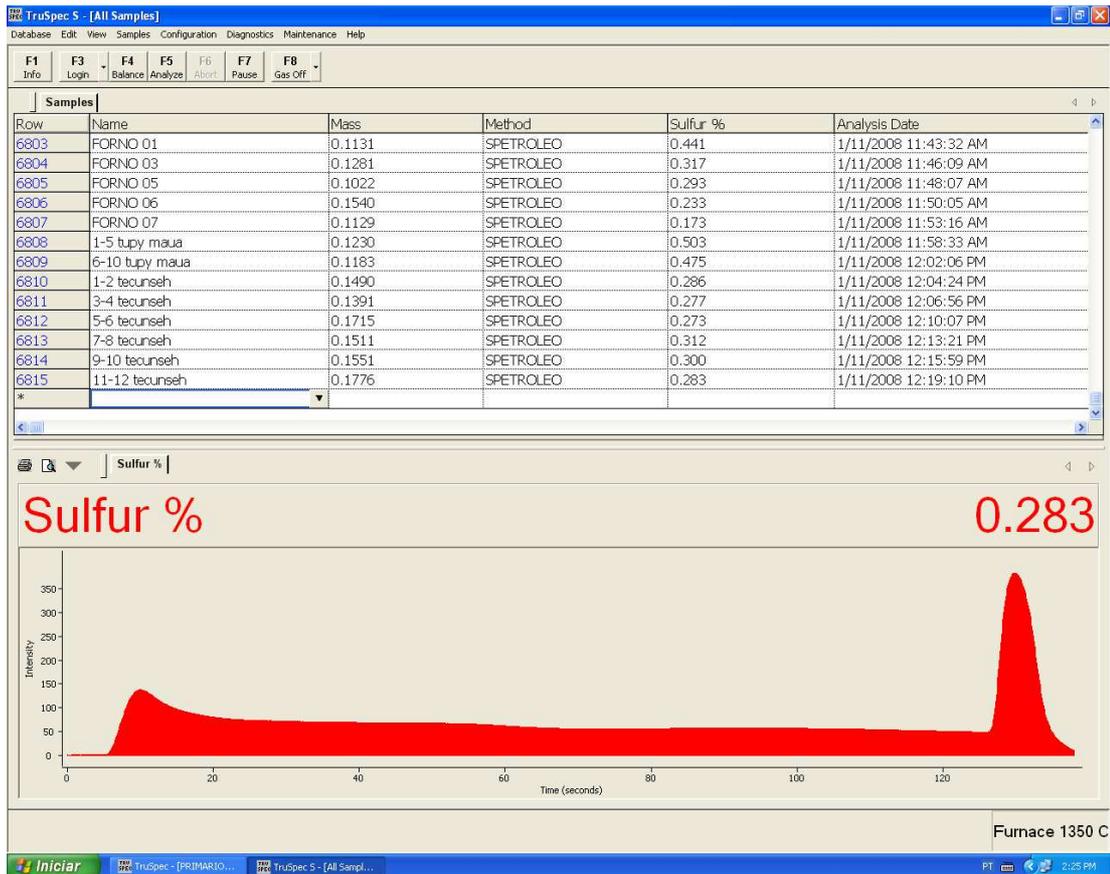


Figura 1.2 – Tela principal do software TruSpec S.

1.2.8 – Determinação do Poder Calorífico

Para realização das análises de Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) foram utilizados um calorímetro modelo C2000 (Figura 1.3) e uma bomba calorimétrica modelo C500 (Figura 1.4), ambos marca IKA.

Colocou-se um cadinho de metal em uma balança analítica (modelo AR2140, marca OHAUS) e em seguida tarou-se a mesma. Pesou-se 0,50g +/- 0,05g de coque verde de petróleo classificado de 0 a 5 mesh.

Com o auxílio de uma pinça prendeu-se o fio de algodão no fio de níquel da bomba calorimétrica (Figura 1.5), encaixou-se o cadinho com a amostra e colocou-se o fio de algodão em contato com a amostra (Figura 1.6). Fechou-se a bomba calorimétrica até o final da rosca e a mesma foi encaixada ao calorímetro.



Figura 1.3 – Calorímetro modelo C2000, marca IKA.

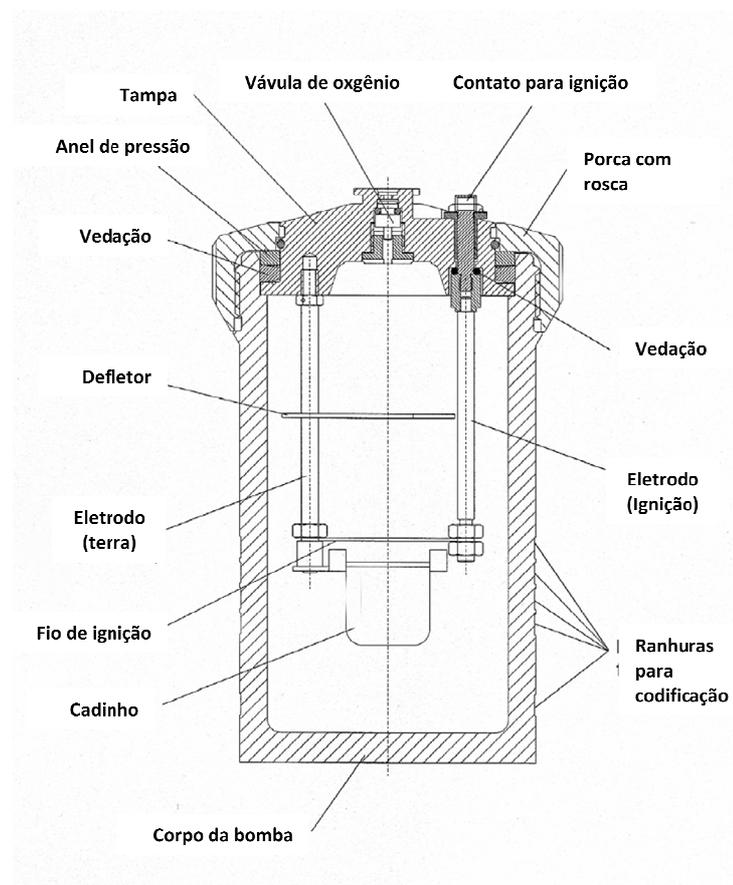


Figura 1.4 – Bomba calorimétrica C500 em corte e seus componentes.

Utilizando-se o software do equipamento, inseriu-se os dados de identificação da amostra, número do experimento e massa de amostra. Logo após acionou-se o comando para iniciar a análise, a qual é conduzida automaticamente pelo equipamento até o final.

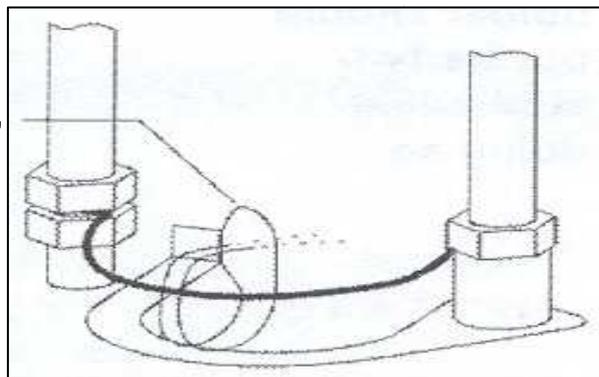


Figura 1.5 – Montagem do fio de algodão.

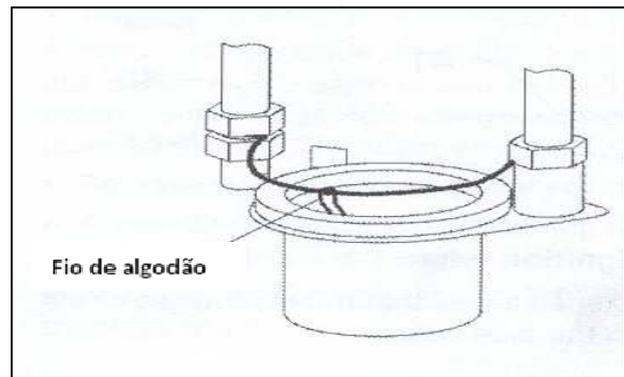


Figura 1.6 – Fio em contato com a amostra.

Ao final da análise o equipamento registra o valor do poder calorífico superior da amostra (PCS) em kcal.kg^{-1} . Já o poder calorífico inferior (PCI), também em unidades de kcal.kg^{-1} , é obtido através de cálculos realizados pelo equipamento, utilizando-se de dados como as porcentagens de hidrogênio, enxofre e umidade.

1.3 Resultados e Discussões

Na tabela 1.2 pode-se verificar o resultado médio das análises químicas do coque verde de petróleo seco, classificado de 0 a 5 mesh, para o período de Novembro de 2009 a Fevereiro de 2010. Analisando-se estes resultados e comparando-os com as especificações, pode-se verificar que o coque apresenta boa estabilidade química. Ressaltam-se os baixos valores encontrados para os parâmetros enxofre e cinzas e os altos valores encontrados para o poder calorífico inferior, características essenciais para a utilização do mesmo para a queima.

Na tabela 1.3 encontra-se a distribuição granulométrica da amostra de 5kg de coque verde de petróleo seco e classificado de 0 a 5 mesh utilizado neste trabalho.

Tabela 1.2 – Valores médios da caracterização química de coque.

Período	Cinzas (%)	Material Volátil (%)	Carbono Fixo (%)	Umidade (%)	Enxofre (%)	PCS (kcal.kg-1)	PCI (kcal.kg-1)
nov/09 a fev/10	0,20	10,08	89,72	0,76	0,86	8597	8433

Tabela 1.3 – Curva granulométrica do coque verde seco.

RESULTADO OBTIDO (%)			
5 mesh	7 mesh	16 mesh	FUNDO
0,00	2,75	30,32	66,93

Como pode ser verificado na Tabela 1.2, os baixos teores de cinzas e material volátil e o conseqüente alto valor de carbono garantem ao coque verde de petróleo altos valores de poder calorífico, da ordem de 8.500 kcal.kg⁻¹. Ressalta-se aqui também que o baixo teor de cinzas garante uma baixa geração de resíduo após a queima do coque de petróleo.

O baixo teor de enxofre também é uma característica que deve ser ressaltada, pois durante o processo de queima há a liberação de SO_x para a atmosfera e, sendo assim, quanto menor a quantidade de enxofre no material a ser queimado menor será o gasto com sistemas de captação deste componente.

Desta maneira, o coque verde de petróleo pode ser utilizado como fonte geradora de energia devido, principalmente, a sua estabilidade química que é característica de sua matéria prima, o petróleo.

1.4 Referências

ALUMINUM LABORATORIES LIMITED. **Standard Method 319-54**: Determination of Volatile Matter in Petroleum Coke. Arvida. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8629**: Carvão mineral: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9092**: Coque: determinação de teor de cinzas. Rio de Janeiro, 1985. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9102**: Cálculo do teor de carbono fixo em coque. Rio de Janeiro, 1985. 2p.

CAMARGO, M.; KOBAYOSHI, M.; CARVALHO, M. F. H.; Produção de Coque de Petróleo e sua Estratégia de Negociação. In: Simpósio de Engenharia de Produção da Universidade Estadual Paulista, 13., 2006, Bauru. **Anais Eletrônicos...** Bauru: Faculdade de Engenharia, 2006. Disponível em: <<http://www.simpep.feb.unesp.br/anais.php>>. Acesso em: 01 mar. 2010.

GOMIDE, R. **Estequiometria industrial**. São Paulo: Edição do Autor, 1979.

HERNÁNDEZ, M. R. R. **Estudo do Projeto de Craqueamento Térmico de Frações Residuais do Petróleo**. 2009. 121f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

JANSSEN, H. R.; ROUSSEL, K. Petroleum Coke. Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry, USA, Vol. A19,; Ed. VCH, pp.235-239, 1991.

MANTELL, C. L. **Cokes**: Carbon and Graphite Handbook, New York: Inter-science, 1968. p.143-161

SZKLO, A. S. **Fundamentos do refino do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

SAWAKAR, A. N. et al. Petroleum Residue Upgrading Via Delayed Coking: A Review. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Canada, v. 85, p. 1-24, 2007.

TOSTA, R. J.; INZUNZA, E. M. Structural evaluation of coke of petroleum and coal tar pitch for the elaboration of anodes in the industry of the aluminum. **Light Metals**, v.2, p. 887-892, 2008. TMS Annual Meeting.

UNIMETAL INDÚSTRIA COMÉRCIO E EMPREENDIMENTOS. **Especificações do Controle de Qualidade**, 2011.

Capítulo 2 – Preparação de Briquetes de Composições de Coque de Petróleo e Fibras Vegetais

2.1 Introdução

2.1.1 - A Biomassa

A biomassa é uma importante fonte de energia para a humanidade. É uma fonte alternativa e renovável de carbono, sendo base dos combustíveis fósseis e dos materiais carbonosos (SILVA, 2007).

A biomassa vegetal é, na verdade, uma mistura complexa de materiais naturais, destacando-se a celulose, lignina, hemicelulose (polioses), e uma pequena quantidade de outras substâncias, tais como, extrativos (ceras, ácidos graxos, taninos) e cinzas resultantes de sais minerais (JENKINS, 1990).

Em geral, a celulose constitui a maior porção e representa cerca de 40% a 50% do material. As partes remanescentes são formadas, predominantemente, por lignina e uma quantidade menor de extrativos, além das cinzas (JENKINS, 1990; MOREIRA, 2005).

Quimicamente, a celulose é uma molécula simples formada por anéis de β -D-glicopiranoose unidas por ligações do tipo β -D (1,4) glicosídicas, de fórmula geral $(C_6H_{10}O_5)_n$. Este polímero natural é um homopolissacarídeo linear cuja unidade repetitiva é a celobiose (RABELO, 2010). Na figura 2.1 está demonstrada a estrutura da celobiose.

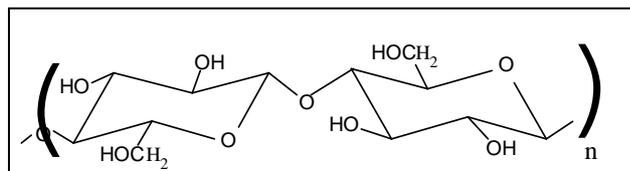


Figura 2.1 – Estrutura química da celobiose.

A lignina é um dos principais componentes da madeira e sua concentração varia de 10 a 30% dependendo do tipo de planta. A lignina é o mais complexo

polímero entre os materiais naturais de alta massa molar e investigações para elucidação de sua estrutura vem sendo realizadas já há muitos anos (HON; SHIRAIISHI, 1990).

No entanto, ainda é difícil determinar exatamente a composição das ligninas provenientes de diversas plantas devido a presença de muitas ligações complexas carbono-carbono entre as unidades, além de vários outros grupos químicos, tornando difícil a degradação do polímero em fragmentos de baixo peso molecular (HON; SHIRAIISHI, 1990).

Segundo FENGEL e WEGENER (1989) a lignina é uma macromolécula complexa, não cristalina, contendo em sua estrutura grupos aromáticos e alifáticos, com vários anéis fenilpropânicos substituídos, ligados através de diferentes tipos de reações. A figura 2.2 apresenta a estrutura da lignina proposta por Nimz em 1974.

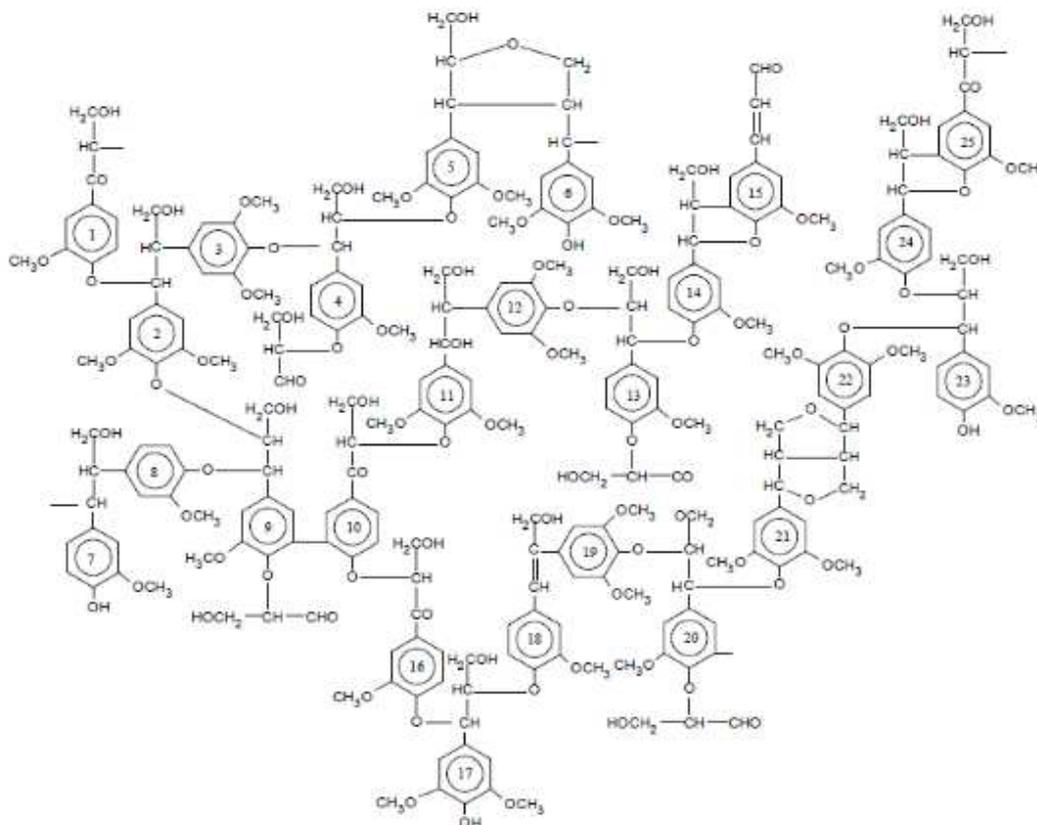


Figura 2.2 – Estrutura da lignina proposta por Nimz em 1974 (FENGEL; WEGENER, 1989)

Na parede celular de tecidos vegetais, a celulose e a lignina estão interpenetradas por uma mistura de polissacarídeos. Estes são denominados de hemiceluloses e pertencem a um grupo de polissacarídeos heterogêneos formados por uma rota biossintética diferente da celulose (SJÖSTRÖM, 1992; FENGER e WEGNER, 1989).

As hemiceluloses diferem da celulose pela composição de várias unidades de açúcar, com cadeias moleculares menores e ramificadas. Os monossacarídeos que constituem as hemiceluloses (Figura 2.3) podem ser divididos em quatro grupos principais, possuindo cada um propriedades e características, são eles: as pentoses, as hexoses, os ácidos hexurônicos e as desoxihexoses (FENGEL; WEGENER, 1989).

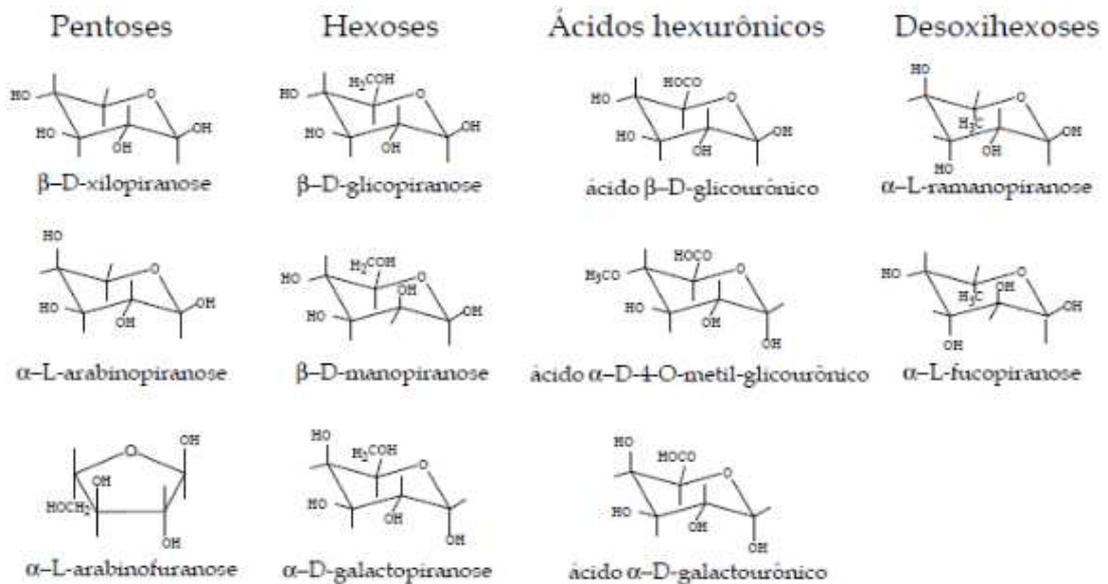


Figura 2.3 – Fórmulas estruturais dos açúcares das hemiceluloses (FENGEL; WEGWNER, 1989)

Os extrativos são substâncias que não fazem parte da parede celular e a maioria é solúvel em solventes orgânicos. Os compostos solúveis em tais solventes correspondem de 4 a 10% do peso seco da madeira. Como exemplos, pode-se citar os terpenos, que são polímeros de isopreno; as resinas que incluem grande variedade de compostos não voláteis como óleos, ácidos graxos, alcoóis, filosterol, dentre outros; existem também os fenóis, principalmente, os taninos. Dentro desta fração de extrativos podem-se incluir carboidratos de baixa massa molecular, alcalóides e lignina solúvel (KLINKE *et al.*, 2004).

2.1.2 – Utilização da Biomassa

A renovação na biomassa dá-se pelo chamado ciclo do carbono. A decomposição ou a queima da matéria orgânica ou de seus derivados provoca a liberação de CO₂ na atmosfera. As plantas, através da fotossíntese, transformam o CO₂ e água nos hidratos de carbono, que compõem sua massa viva, liberando oxigênio. Desta forma, a utilização da biomassa, desde que não seja de maneira predatória, não altera a composição média da atmosfera ao longo do tempo (ALMEIDA, 2006). Neste contexto, torna-se interessante, principalmente, a utilização de resíduos provenientes de biomassa.

Resíduo é tudo aquilo que resta de um processo de exploração ou produção, de transformação ou utilização. Os resíduos que se originam do processamento da madeira, móveis usados, artigos de madeira, mourões, estacas, bagaço de cana, palha de arroz, galhos de árvores são resíduos lignocelulósicos que se apresentam em formas e granulometrias das mais variadas, apresentando de modo geral, baixa densidade e alto teor de umidade (QUIRINO, 2003).

Na tabela 2.1 está apresentada a composição média de alguns resíduos lignocelulósicos. Os resíduos podem ser agrupados em três categorias principais:

- Resíduos agrícolas, gerados diretamente no campo durante a colheita da safra (por exemplo: a palha dos cereais);
- Resíduos florestais (galhos, folhas, etc., gerados na exploração florestal);
- Resíduos agro-industriais, gerados no beneficiamento de grãos, gramíneas e madeira (casca de arroz, de café, de amendoim, de nozes, bagaço de cana-de-açúcar, serragem, etc).

A cana de açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma gramínea originária do sudeste asiático, e introduzida no Brasil pelos portugueses no início do século XVI, sendo hoje muito cultivada em regiões tropicais e subtropicais do país (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

O Brasil é o maior produtor de cana de açúcar para a indústria de açúcar e álcool. Após a extração do caldo, do qual são produzidos o açúcar e o álcool etílico, o bagaço que sobra é em parte queimado para a geração de energia elétrica e térmica para os processos industriais (HASSUANI et al., 2005).

Tabela 2.1 - Composição média de diferentes tipos de materiais lignocelulósicos.

Biomassa	Cinzas (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	2,88	41,30	22,64	18,26
Casca de amendoim	5,88	35,68	18,67	30,22
Casca de arroz	23,46	31,29	24,32	14,30
Casca de coco	0,68	36,28	25,06	28,73
Casca de milho	18,10	33,28	26,94	13,97
Fibra de coco	0,88	47,74	25,89	17,78
Madeira (Subadul)	0,90	39,75	23,98	24,68
Palha de arroz	19,78	37,04	22,67	13,64
Palha de trigo	11,19	30,52	28,90	16,38
Milho (planta)	6,84	42,71	23,61	17,50
Resíduo de algodão	5,36	77,79	15,96	0,00
Sabugo de milho	2,83	40,32	28,66	16,57

Fonte: Jenkins (1990)

Devido ao excedente de bagaço e a legislação que restringe gradualmente a queima da palha no campo, o que deverá atuar positivamente para que este resíduo seja incorporado ao sistema de geração de energia nos próximos anos, foi estimado que as usinas de açúcar e álcool podem liberar de 30 a 50% do bagaço produzido para usos alternativos (MACEDO, 2001).

O *Eucalyptus grandis* é uma das espécies mais amplamente plantada no Brasil (cerca de 55%), seguida pelo *Eucalyptus saligna* (17%), conforme estatísticas da Revista da Madeira 2003 e supera qualquer outra em incremento volumétrico quando as condições ambientais são adequadas.

A madeira proveniente do eucalipto rosa é considerada leve e fácil de trabalhar e de usinar, tendo uma elevada permeabilidade, o que para algumas utilidades não é uma característica viável. Além disto, é uma espécie bastante versátil e indicada para usos múltiplos, apesar de apresentar problemas de empenamento, contrações e rachaduras nas operações de desdobro e secagem (ALZATE, 2004).

A retomada do desenvolvimento econômico e social do país exigirá a construção de milhões de habitações, aumento da produção industrial, importações e exportações. Este crescimento implica no aumento da demanda de materiais e matérias-primas, entre elas a madeira. Nesse contexto, a indústria florestal brasileira tem uma missão a cumprir para evitar que o país, em alguns anos, se transforme em importador de madeira. Atualmente, as importações e exportações de madeira serrada se equivalem. Considerando-se o potencial representado pelos *Eucalyptus* há condições ambientais e conhecimentos silviculturais para dar ao país vantagem comparativa na produção de matéria prima florestal (PONCE, 1995).

Com o aumento da utilização de madeira serrada será gerado muito mais pó de serra que poderá ser utilizado como matéria-prima para produção de briquetes.

Uma das principais barreiras à produção e utilização de energia renovável é o fato de no uso de combustíveis convencionais não serem considerados os custos externos da energia como, por exemplo, os custos ambientais. É importante que se crie uma nova conjuntura em que todas as fontes de energia estejam em “igualdade”. Para a produção de energia a partir da biomassa, que envolve pouco ou nenhum custo ambiental, a internalização do custo da energia poderia ser um fator determinante para sua implementação em larga escala. Esse aspecto, juntamente com a produtividade agrícola e os avanços tecnológicos, poderiam ser os fatores determinantes para assegurar maior competitividade com os combustíveis fósseis (ROSILLO-CALLE, et al., 2005).

Dentre as vantagens na utilização de resíduos lignocelulósicos como fonte de energia estão a diminuição dos níveis de emissão de CO₂ e enxofre, melhor manejo da terra, controle de resíduos e reciclagem de nutrientes. Porém as vantagens

citadas anteriormente só serão alcançadas mediante a modernização do uso industrial da biomassa produzindo energia de forma eficiente e sustentável, ou seja, envolvendo os aspectos econômicos, ambientais e sociais.

2.1.3 - O Processo de Briquetagem

O mundo se encontra diante de uma preocupante situação em relação ao seu suprimento sustentável de energia, e este problema tem um número reduzido de soluções, principalmente no que tange aos combustíveis fósseis. Cada país deverá, então, concentrar esforços de imediato para que ele possa dispor da maior flexibilidade possível de opções no campo energético (COUTO, 2004).

Desta forma, a produção de briquetes compostos de coque verde de petróleo seco e fibras vegetais vem ao encontro desta procura pela diminuição do consumo de fontes não renováveis de energia e a diversificação da matriz energética.

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, porém, com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados (DEMIRBA, 1998).

A utilização de resíduos vegetais (galhos, cascas de arroz e de café, bagaço, serragem, etc.) como combustível representa uma interessante alternativa aos combustíveis sólidos tradicionais (lenha e carvão). O modo mais fácil e simples de utilizar o poder calorífico destes materiais é a combustão direta. Entretanto, esta prática apresenta algumas desvantagens (SRIVASTAVA; MAHESHWARI; OHIA, 1995):

- Os resíduos vegetais possuem baixa densidade tornando difícil e caro o manuseio, o transporte, o armazenamento e o uso como combustível.

- A maioria dos resíduos agroflorestais contém elevada umidade. Portanto, entre 18 e 20% do calor gerado na combustão é consumido para secar a própria biomassa, perdendo assim grande parte de seu potencial energético.

A compactação dos resíduos vegetais em forma de briquetes (briquetagem) pode ser uma solução para alguns destes problemas.

O processo de compactação dos resíduos florestais diminui o volume do material, aumentando sua densidade além de proporcionar um formato geométrico definido, facilitando assim seu manuseio, armazenamento e transporte.

A adição de coque verde de petróleo seco às fibras vegetais no processo de compactação contribui para a diminuição da umidade, já que este tipo de coque apresenta umidade máxima de 1,0%.

Existem vários mecanismos que permitem a ligação entre as partículas da biomassa compactada e, geralmente, todos eles colaboram para obter a resistência e a coesão final do briquete. Grover e Mishra (1996) identificaram os seguintes mecanismos:

- Ação de aglutinantes (já presentes na matéria-prima ou adicionados);
- Forças de Van Der Waals;
- Emaranhamento (entrelaçamento) entre partículas;

Os compostos ligantes que já estão presentes na matéria-prima podem ser ativados pelas elevadas pressões e temperaturas alcançadas no processo de compactação. Pode ser o caso da lignina, presente nas células da biomassa, que “amolece” entre 100 e 190 °C e age como uma cola entre as partículas. Os mecanismos de emaranhamento e a ativação de forças de valência e de Van Der Waals acontecem pela forte aproximação e deformação das partículas provocada pelas pressões de compactação. Mesmo depois da compactação, as partículas da matéria-prima ainda são perceptíveis.

2.2 Experimental

A preparação das amostras e a compactação dos materiais foram realizadas nos laboratórios de pesquisa e de ensino da UFSCar/Campus Sorocaba.

Primeiramente, as fibras vegetais utilizadas, eucalipto e bagaço de cana, foram trituradas em um moinho de facas. Posteriormente, as fibras trituradas foram classificadas em um conjunto de peneiras vibratórias por 2 minutos utilizando peneiras com malhas de aberturas de 42 e 60 mesh.

O coque (“verde”) de petróleo, na forma de pó, foi classificado de 0 a 5 mesh. As umidades das misturas de fibras com coque de petróleo foram determinadas utilizando-se uma balança de infravermelho, conforme descrito no item 1.2.3 deste trabalho.

Para a fabricação dos briquetes foram realizadas misturas de coque de petróleo e fibras de eucalipto e coque de petróleo e fibras de cana de açúcar, com massa total de 20g nas proporções: 100% de coque, 75/25, 50/50, 25/75 e 100% de fibras vegetais. Para todas as misturas, exceto para a composição com 100% de coque de petróleo, procedeu-se o ajuste da umidade para aproximadamente 10%.

As misturas foram separadas em sacos plásticos e homogeneizadas manualmente agitando-se os sacos durante trinta segundos antes de se pesar 20g em um béquer. Antes da transferência do material dos béqueres para o molde, o mesmo era novamente homogeneizado com o auxílio de uma espátula. Após a homogeneização, as misturas foram adicionadas a um molde cilíndrico de aço inox com $9,62\text{cm}^2$ de área que foi colocado em uma prensa hidráulica (tipo placas paralelas) sob 12 t de força, durante 15 segundos. Portanto, durante a moldagem, a pressão atingida foi de aproximadamente 122,33 MPa. A figura 2.4 mostra o conjunto molde e prensa hidráulica preparado para a compactação.



Figura 2.4 – Conjunto prensa hidráulica e molde utilizado na compactação.

Para informação e comparação, os equipamentos atuais que produzem briquetes de resíduos lignocelulósicos em larga escala trabalham com pressões de até 117,67 MPa, com umidade do material variando entre 10 e 12% (BIOMAX, 2010).

Portanto, a opção de se padronizar a umidade das misturas entre 10 e 12% e a utilização de 12 t de força advém dos parâmetros utilizados nas indústrias de briquetagem, conforme citado no parágrafo anterior.

2.3 Resultados e Discussões

As figuras 2.5 e 2.6 apresentam fotografias dos briquetes formados para misturas de coque de petróleo e fibras de eucalipto e coque de petróleo e fibras de bagaço de cana, respectivamente.



Figura 2.5 – briquetes com composições de coque e fibras de eucalipto

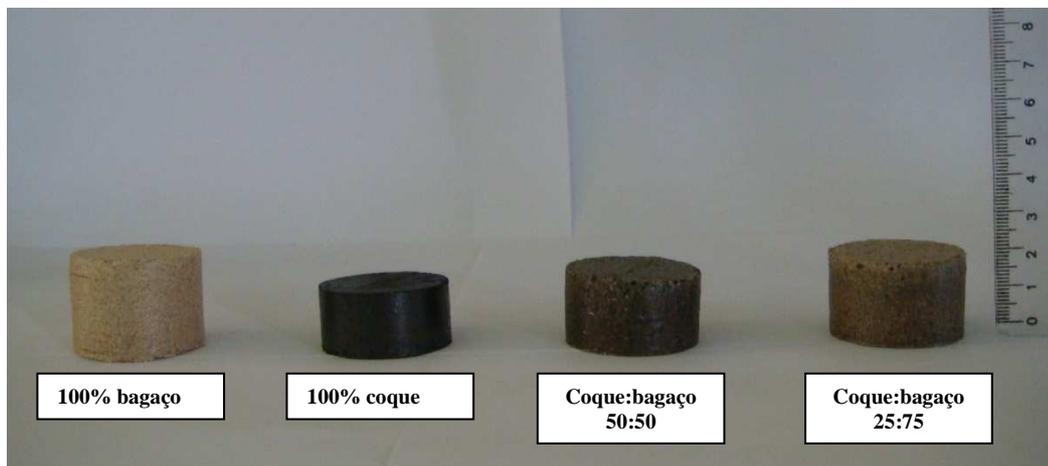


Figura 2.6 – briquetes com composições de coque e fibras de cana de açúcar

Os briquetes resultantes das misturas 50/50 e 25/75, coque/fibras vegetais, apresentaram boa aglomeração e adequada compactação. Os briquetes compostos de 100% fibra também apresentaram boa aglomeração. Vale ressaltar que tanto as misturas quanto as fibras tiveram suas umidades padronizadas entre 10% e 12%, o que auxiliou na formação dos briquetes. Os valores de umidade encontrados para cada mistura, pré compactação, encontram-se na tabela 2.2.

Nem para todas as misturas observou-se a formação de briquetes. Os briquetes compostos de 75/25, coque/fibras vegetais apresentaram baixa aglomeração e, conseqüentemente, baixa compactação. Conforme pode-se observar na figura 2.7, estes briquetes começavam a se desmanchar assim que

eram retirados do molde ainda sobre a prensa hidráulica. Desta forma, estes se desintegravam facilmente.



Figura 2.7 – Briquetes com baixa compactação

Tabela 2.2 – Valores de umidade para as misturas pré compactação.

Valores de Umidade das misturas pré compactação (%)				
Relação coque de petróleo/fibras de eucalipto				
100/0	75/25	50/50	25/75	0/100
0,70	10,01	11,08	9,95	10,65
Relação coque de petróleo/fibras de bagaço de cana				
100/0	75/25	50/50	25/75	0/100
0,70	9,97	10,75	11,16	9,97

Foi possível obter a formação de briquetes contendo 100% coque de petróleo, porém, estes se apresentaram bem frágeis de forma que precisavam ser manuseados com cuidado.

Durante o processo de briquetagem notou-se certo desgaste do molde conforme aumentava-se a proporção de coque de petróleo nas misturas. O molde utilizado passou a apresentar ranhuras internas, onde começou a ocorrer acúmulo de material. Este acúmulo culminou com o travamento do êmbolo dentro do molde. Sendo assim, houve a necessidade de se proceder a limpeza do molde após cada briquetagem de composição 25/75 coque e fibra e também para a briquetagem apenas com coque de petróleo.

Este estudo mostrou que é possível a produção de briquetes através de diversas combinações de composições de biomassa e coque de petróleo. Porém, à medida que se aumenta a proporção de coque de petróleo, a aglomeração das partículas e a conseqüente formação de briquetes tornam-se mais difíceis.

Em uma análise visual os briquetes com composição 50/50 coque e fibras vegetais apresentaram uma aparência tão boa quanto aqueles formados apenas de fibras vegetais. Isso indica, qualitativamente, uma boa aglomeração entre as partículas de coque e fibras vegetais.

Em relação ao manuseio nota-se uma significativa diferença entre os briquetes de composição 50/50 e 25/75 coque e fibras vegetais. Os briquetes com composição 25/75, apesar de apresentarem uma boa resistência ao manuseio, apresentavam certo grau de “esfarelamento” enquanto os de composição 50/50 aparentavam ser mais rígidos não apresentando “esfarelamento” ao manuseio.

A questão do desgaste do molde quando da adição de coque de petróleo é um ponto de atenção que deverá ser mais estudado em trabalhos futuros. Porém, com o avanço tecnológico da engenharia de materiais pode-se dizer que há sempre a possibilidade de se trabalhar com materiais mais resistentes na fabricação dos moldes para compactação.

2.4 Referências

ALMEIDA, S. C. A.; CLUA, E. W. G. **Perspectivas do uso da biomassa para a geração descentralizada de energia no Mercosul**. [s.l]: [s.n], 2006. Trabalho submetido ao Prêmio Mercosul de Ciência e Tecnologia.

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de Eucalyptus grandis, E. saligna e E. grandis x urophylla**. 2004. 133p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004

BIOMAX. **Briquetagem**. Disponível em <www.biomaxind.com.br/site/br/briquetagem.html>. Acesso em 13 nov. 2010.

COUTO, L. C. et. al. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

DEMIRBA, A. Briquetting waste paper and wheat straw mixtures. **Fuel Processing Technology**, Elsevier Science B.V., v.55, n.2, p.175-183, may, 1998.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood**: chemistry, ultra structure and reactions. New York: Walter de Gruyter, 1989. p. 66-105.

GROVER, P. D.; MISHRA, S. K. **Biomass Briquetting**: technology and practices, Bangkok: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1996.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass power generation**: sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. Série Caminhos para Sustentabilidade.

HON, D. N. S.; SHIRAIISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. [s.l]: Marcel Dekker INC, 1990.

JENKINS, B. M. Fuel Properties for Biomass Materials. In: **International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture**: The Role of Biomass Fuels. New Delhi, India, 1990. p. 21-23.

KLINKE, H. B.; THOMSEN, A. B.; AHRING, B. K. Inhibition of ethanol-producing yeast and bacteria by degradation products produced during pre-treatment of biomass. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.66, p.10-26, 2004.

MACEDO, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil**: situação atual, oportunidades e desenvolvimento, Relatório para o MCT. Brasília: [s.n], 2001.

MOREIRA, J. R. et al. Novas tecnologias para os vetores modernos de energia de biomassa. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Campinas: Editora UNICAMP, 2005. p. 382.

PONCE, R. H. Madeira serrada de eucalipto: desafios e perspectivas. In: Anais do Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria. 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995.

POR que usar eucalipto? **Revista da Madeira**, n.75, ago. 2003.

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. [s.l]: LPF/IBAMA, 2003.

RABELO, S. C. **Avaliação e otimização de pré tratamentos e hidrólise enzimática do bagaço de cana de açúcar para produção de etanol de segunda geração**. 2010. 447f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

ROSILLO-CALLE, F., BAJAY, S. V., ROTHMAN, H. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2005.

SILVA, C. A. **Estudo Técnico-Econômico da Compactação de Resíduos Madeiros para Fins Energéticos**. 2007. 68f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry Fundamentals and Applications**. 2.ed. San Diego: Academic Press Inc., 1992.

SRIVASTAVA, P. K.; MAHESHWARI, R. C.; OJHA, T. P. **Biomass briquetting and utilization**. New Delhi: Jain Brothers, 1995.

Capítulo 3 – Determinação do Poder Calorífico Superior dos Briquetes de Composições de Coque de Petróleo e Fibras Vegetais

3.1 Introdução

O poder calorífico de um energético qualquer pode ser definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível (CORTEZ et al, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, pode-se definir o poder calorífico inferior (PCI), ao invés de poder calorífico superior (PCS), quando não se considera o calor latente de condensação da umidade dos produtos da combustão. A diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível.

No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma (BRIANE & DOAT 1985).

Em geral, a variação da energia interna de um sistema é:

$$dU = dq + dw_{\text{exp}} + dw_e$$

onde dw_e é o trabalho extra, além do trabalho de expansão, dw_{exp} . Um sistema mantido a volume constante não efetua trabalho de expansão, de modo que $dw_{\text{exp}} = 0$. Se o sistema for incapaz de produzir qualquer outro tipo de trabalho, então $dw_e = 0$ também. Nestas circunstâncias:

$$dU = dq$$

Para uma transformação finita a volume constante

$$\Delta U = q_v$$

Conclui-se, então, que ao se medir a energia térmica fornecida a um sistema a volume constante ($q > 0$) ou cedida por um sistema a volume constante ($q < 0$), quando ocorre uma mudança no estado do sistema, estamos, realmente, medindo a variação de energia interna nesta mudança (ATKINS, 2003).

Ainda, de acordo com Atkins (2003), a calorimetria é o estudo do calor transferido durante um processo físico ou químico. Um calorímetro é um dispositivo para medir o calor transferido. O dispositivo mais comum para medir ΔU é a bomba calorimétrica adiabática (figura 3.1). O processo que se quer investigar – por exemplo, uma reação química – é disparado no interior de um vaso a volume constante, a bomba calorimétrica. Este vaso opera mergulhado em um banho de água com agitação adequada, e o conjunto da montagem é o calorímetro. O calorímetro, por sua vez, trabalha mergulhado em um banho externo e as temperaturas dos dois banhos são permanentemente acompanhadas e mantidas iguais. Desta forma, não há perda nem ganho de calor do calorímetro para as vizinhanças (no caso, o banho externo), e assim o calorímetro opera adiabaticamente.

A variação de temperatura, ΔT , observada no calorímetro é proporcional ao calor que a reação libera ou absorve. Então, pela medição direta de ΔT podemos determinar q_v e, então, descobrir o valor de ΔU . A conversão de ΔT a q_v se consegue pela calibração do calorímetro mediante um processo que libere uma quantidade conhecida e bem determinada de energia, e calculando-se a constante do calorímetro, C , pela relação:

$$q = C \Delta T$$

A constante C pode ser determinada pela combustão de uma massa conhecida de uma substância (o ácido benzóico é muito usado) que libera uma quantidade conhecida de calor. Com a constante C determinada, pode-se interpretar a elevação de temperatura que se mede diretamente como uma troca térmica.

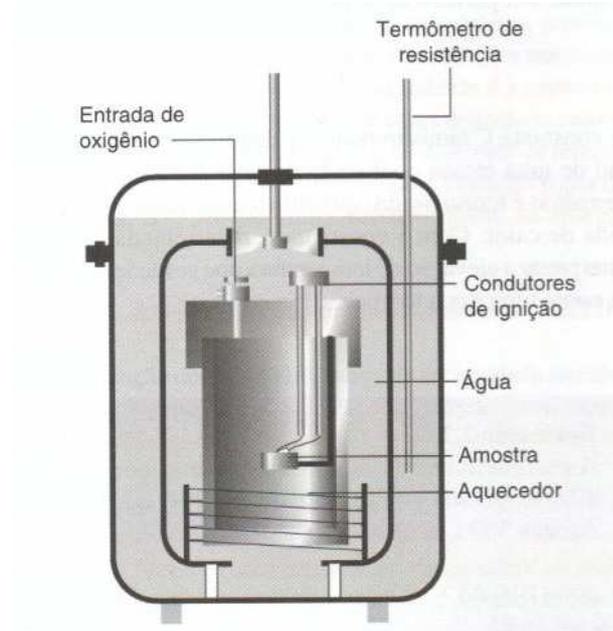


Figura 3.1 – Bomba calorimétrica adiabática (ATKINS, 2003).

3.2 Experimental

Os briquetes utilizados para a realização do ensaio de poder calorífico superior (PCS) foram quebrados e então foram retiradas, de pontos distintos de cada briquete, frações de 0,50g de amostra. Os ensaios, em triplicata, foram realizados no Laboratório de Controle de Qualidade da Unimetal Indústria Comércio e Empreendimentos e o PCS foi determinado conforme o item 1.2.8 deste trabalho.

3.3 Resultados e Discussões

Analisando-se os resultados contidos na tabela 3.1, nota-se que a adição de coque de petróleo (nas proporções utilizadas: 25, 50 e 75% de coque) proporcionou um aumento considerável no poder calorífico quando comparado ao briquete contendo 100% fibra vegetal.

Tomando-se como referência os valores médios encontrados para os briquetes 100% coque de petróleo e 100% fibra vegetal e realizando-se cálculos para a obtenção dos valores teóricos de poder calorífico superior das misturas, pode-se verificar na tabela 3.2 que os valores encontrados pela análise em

calorímetro estão muito próximos àqueles calculados. Essa proximidade dos resultados indica que houve homogeneização das matérias-primas durante o processo de briquetagem sob pressão.

Tabela 3.1 – Poder Calorífico Superior (PCS)

Poder Calorífico Superior dos Briquetes (kcal.kg⁻¹)					
Relação coque de petróleo/fibras de eucalipto					
Amostras	100/0	75/25	50/50	25/75	0/100
1	8603	7720	6585	5355	4240
2	8687	7511	6286	5475	4252
3	8606	7840	6360	5709	4280
Média	8632	7690	6410	5513	4257
Relação coque de petróleo/fibras de bagaço de cana					
Amostras	100/0	75/25	50/50	25/75	0/100
1	8603	6799	6225	5817	4133
2	8687	6800	5913	5506	4139
3	8606	6886	6258	5974	4109
Média	8632	6828	6132	5766	4127

Tabela 3.2 – Poderes caloríficos superiores (prático e calculado)

Comparativo do Poder Calorífico Superior (kcal.kg⁻¹)			
	Relação coque de petróleo/fibras de eucalipto		
	75/25	50/50	25/75
PCS prático	7690	6410	5513
PCS calculado	7538	6445	5351
	Relação coque de petróleo/fibras de bagaço de cana		
	75/25	50/50	25/75
PCS prático	6828	6132	5766
PCS calculado	7506	6380	5253

As figuras 3.2 e 3.3 apresentam os gráficos com os valores de PCS dos briquetes compostos por coque e fibras de eucalipto e coque e fibras de bagaço de cana, respectivamente. Os gráficos possibilitam uma melhor visualização da proximidade entre os dados calculados e práticos.

A partir destes gráficos também pode-se observar que os briquetes compostos de coque e fibras de eucalipto apresentam resultados muito mais próximos aos calculados sendo que as curvas quase se sobrepuseram. Isso é um indício de ocorreu uma melhor homogeneização ou dispersão entre as fibras de eucalipto e coque do que entre bagaço e coque.

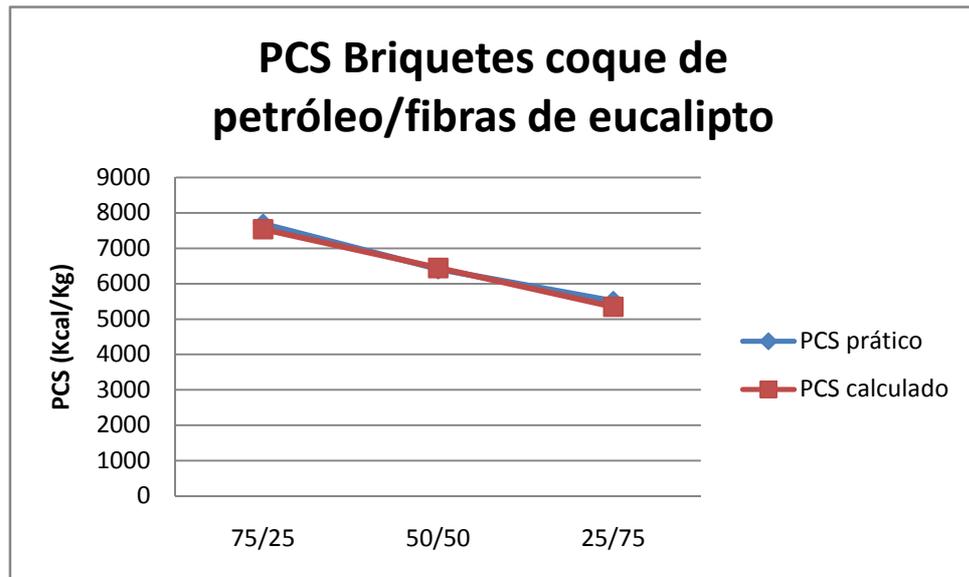


Figura 3.2 – PCS briquetes coque/fibra de eucalipto: prático e calculado

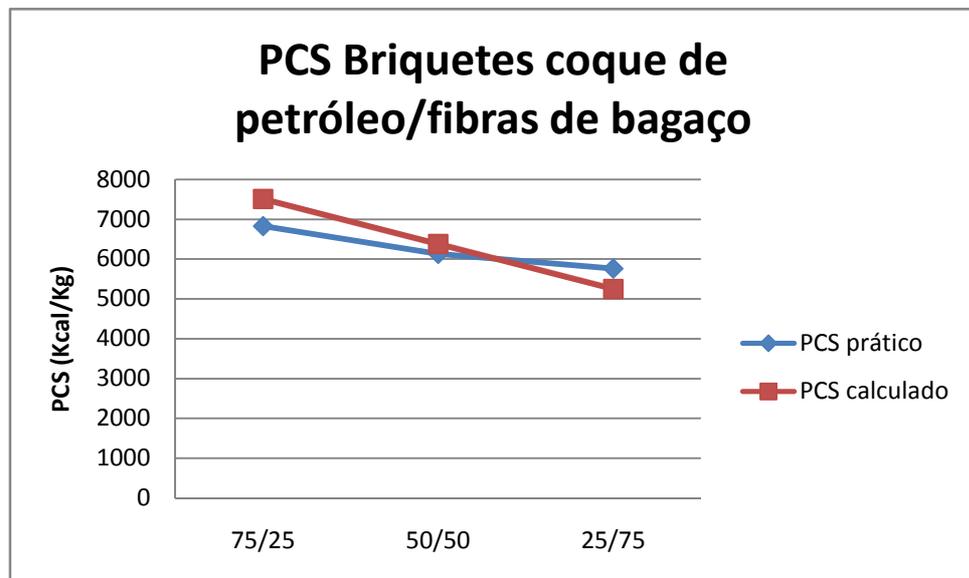


Figura 3.3 – PCS briquetes coque/fibra de bagaço: prático e calculado

A partir da análise do PCS, Russomano (1987) classificou alguns combustíveis em alto (PCS maior que 8000 kcal.kg⁻¹), médio (PCS entre 8000 e 4000 kcal.kg⁻¹) e baixo (PCS menor que 4000 kcal.kg⁻¹).

Avaliando-se os resultados das tabelas anteriores nota-se que os valores encontrados para os briquetes compostos de 100% fibra vegetal encontravam-se muito próximos ao limite inferior dos combustíveis classificados como médio. A adição de coque de petróleo, para todas as composições, elevou os resultados de PCS trazendo-os para a proximidade do meio da faixa de classificação.

Em geral o valor do poder calorífico superior (PCS) aumentou quase que proporcionalmente ao percentual de coque adicionado a cada mistura.

Os resultados encontrados para as composições de coque e fibra vegetal revelaram que houve um aumento de 50% no poder calorífico (composição 50/50) quando comparados com os briquetes formados por 100% biomassa.

Este aumento no PCS fez com os briquetes compostos de coque e fibras vegetais pudessem ser comparados ao combustível de fonte mineral denominado de antracito que, por sua vez, apresenta PCS da ordem de 5.500 a 6.500kcal.kg⁻¹ (Fonte: Unimetal Indústria, Comércio e Empreendimentos).

Os valores de PCS com ordens de grandeza muito próximos quando realizados em triplicata, demonstram um indício preliminar que ocorreu boa homogeneização do coque com as fibras vegetais. Apenas para os briquetes de composição 25/75 coque e bagaço de cana que os resultados calculado e prático apresentaram uma certa discrepância. Para este caso, há a necessidade de um estudo mais aprofundado, pois apesar da discrepância, os resultados em triplicata apresentaram valores muito próximos, indicando que ocorreu homogeneização.

3.4 Referências

ATKINS, P.; PAULA, J. **Físico-Química**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003. 356 p.
Bibliografia: p. 43 - 44.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation**: la fabrication du charbon de bois. Aix-en-Provence: ÉDISUD, 1985. 180p.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008. 736 p.

RUSSOMANO, V. H. **Introdução à administração de energia na indústria**. São Paulo: Pioneira, 1987. 262 p.

Capítulo 4 – Determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral dos Briquetes de Composições de Coque de Petróleo e Fibras Vegetais

4.1 Introdução

O ensaio de resistência à compressão diametral é muito utilizado para ensaios em concreto e conhecido internacionalmente como “*Brazilian Test*”, por ter sido desenvolvido pelo pesquisador brasileiro Lobo Carneiro.

Segundo Buest (2006) este ensaio consiste em submeter corpos-de-prova cilíndricos a cargas de compressão ao longo de duas linhas axiais, diametralmente opostas. A tensão de compressão produz uma tensão de tração quase uniforme normal ao plano de carregamento conforme indicado na figura 4.1. O valor da resistência à tração é calculado pela equação 4.1

$$T=2.P/\pi.l.d \quad (4.1)$$

Onde

T = Resistência de tração

P = Carga de ruptura

l = Comprimento do corpo-de-prova

d = Diâmetro do corpo-de-prova

O intuito de realização deste ensaio é verificar qual das composições apresentará uma resistência à tração maior para se obter um indicativo de qual composição, teoricamente, suportaria melhor o manuseio, transporte e armazenamento em pilhas.

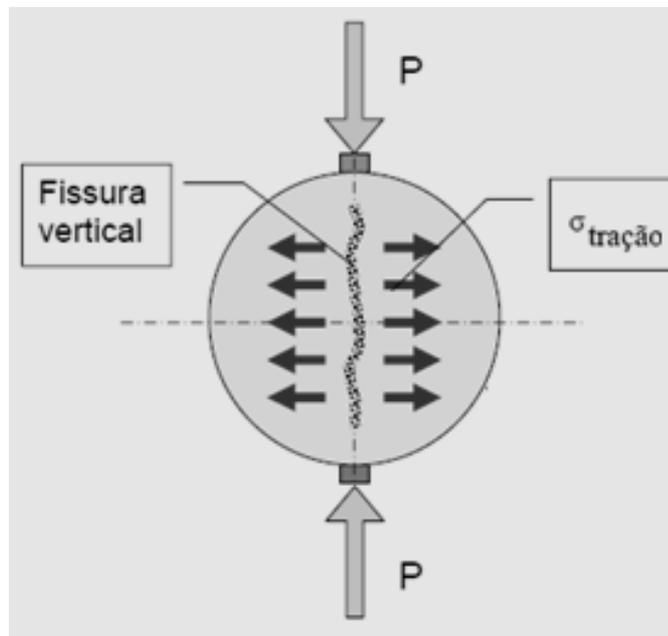


Figura 4.1 – Representação do corpo de prova durante ensaio de compressão diametral.

4.2 Experimental

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos, marca EMIC, modelo DL 30000N, com uma célula de carga de 10000kgf, conforme pode ser visto na figura 4.2. O equipamento foi acoplado a um computador e o ensaio foi conduzido pelo software TESC versão 3.04.

Antes da realização do ensaio, os briquetes tiveram suas medidas determinadas (comprimento e diâmetro) com um paquímetro digital, e os valores foram inseridos no software TESC versão 3.04. Posteriormente os briquetes, um a um, foram presos ao equipamento e, então, foi aplicada uma carga de compressão à razão de 3mm/min., ao longo de duas linhas axiais diametralmente opostas. A carga foi aplicada até a ocorrência da ruptura do briquete. Os ensaios foram realizados para cinco corpos-de-prova (CP) de cada mistura coque e fibras vegetais.

Os resultados dos ensaios foram plotados em gráficos de tensão (MPa) versus deformação (mm).

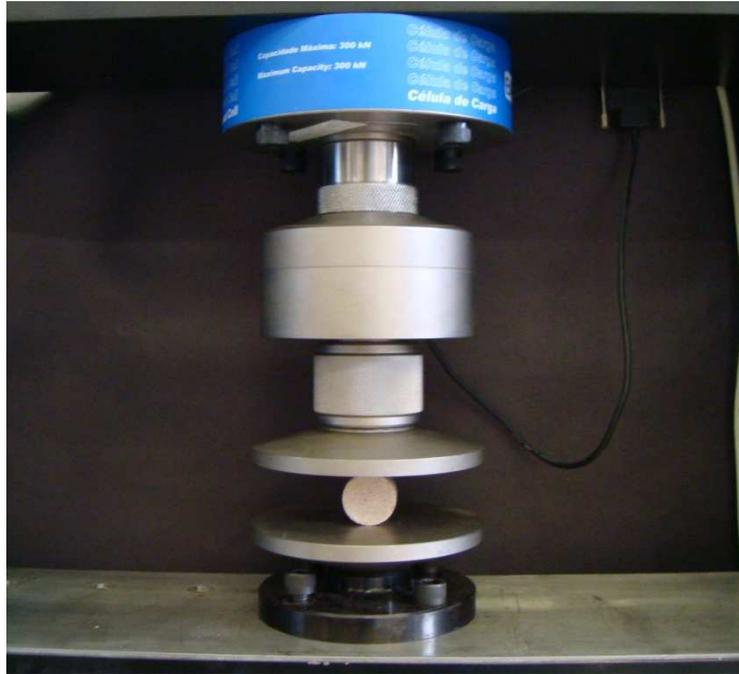


Figura 4.2 – Fotografia do ensaio de resistência à compressão diametral.

4.3 Resultados e Discussões

As figuras 4.3 a 4.9 contêm os gráficos ou curvas de tensão-deformação para todos os briquetes produzidos.

Observando-se o comportamento geral das curvas pode-se notar que apresentam características de materiais relativamente frágeis, com baixos valores de deformação (em torno de 1,2 mm) para a maioria dos briquetes. Em alguns corpos-de-prova observa-se maiores valores de deformação (Figuras 4.6 e 4.9).

No entanto, em nenhum dos briquetes ensaiados foi possível a detecção visual de ruptura total do corpo-de-prova, ou seja, não houve separação de duas superfícies fraturadas.

Algumas curvas (principalmente correspondentes aos CP3 e CP4) apresentadas na figura 4.4 demonstram que o equipamento de ensaio de tração não conseguiu detectar o final do ensaio para os briquetes de composição 100% coque de petróleo. Isso deve-se ao fato de não ter ocorrido ruptura destes corpos-de-prova,

mas sim a ocorrência de trincas que se propagaram pelo interior do material mas não romperam totalmente os mesmos. Já as curvas dos CP1 e CP2 apresentam perfis de materiais com características frágeis, além de baixos valores de deformação (aproximadamente 0,2 mm).

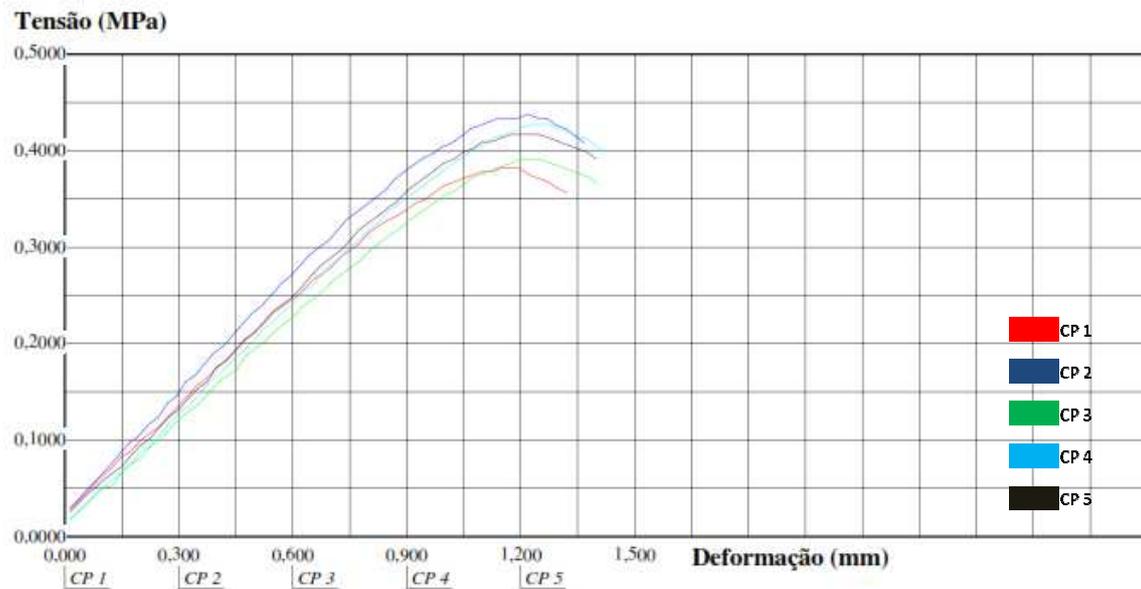


Figura 4.3 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 100% bagaço

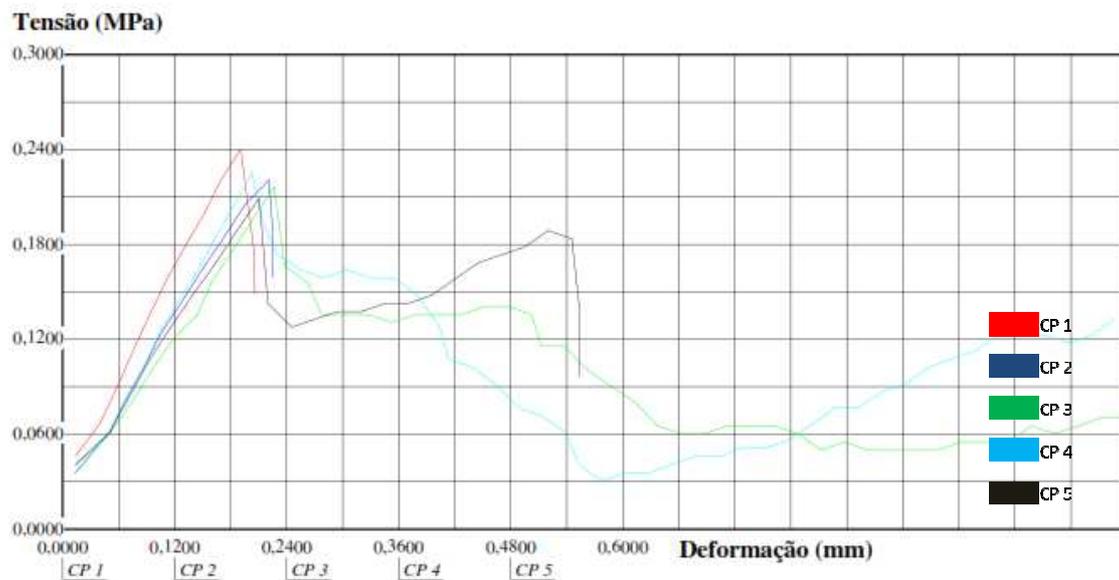


Figura 4.4 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 100% coque

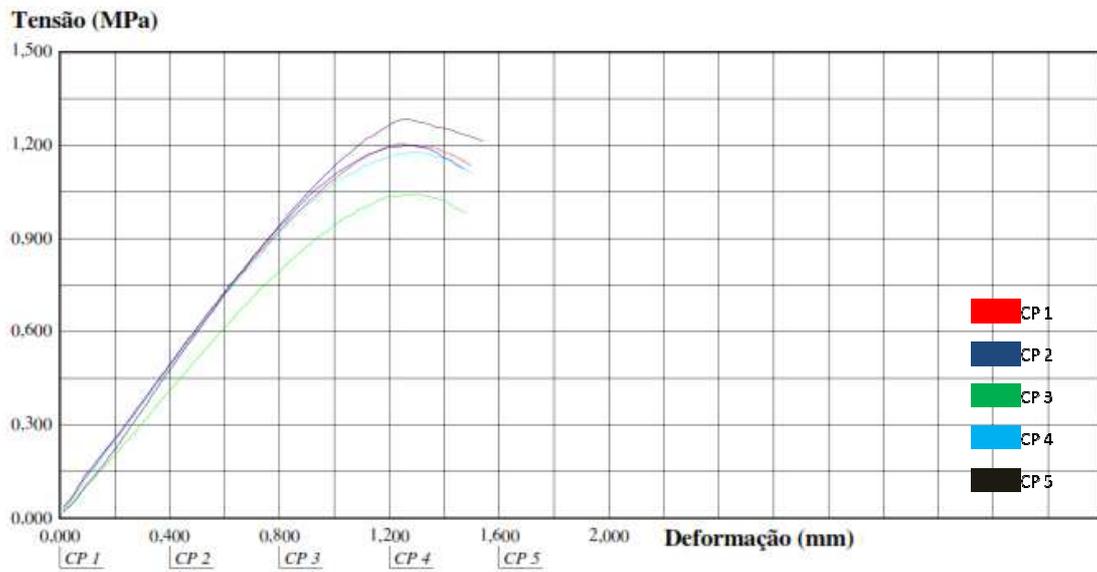
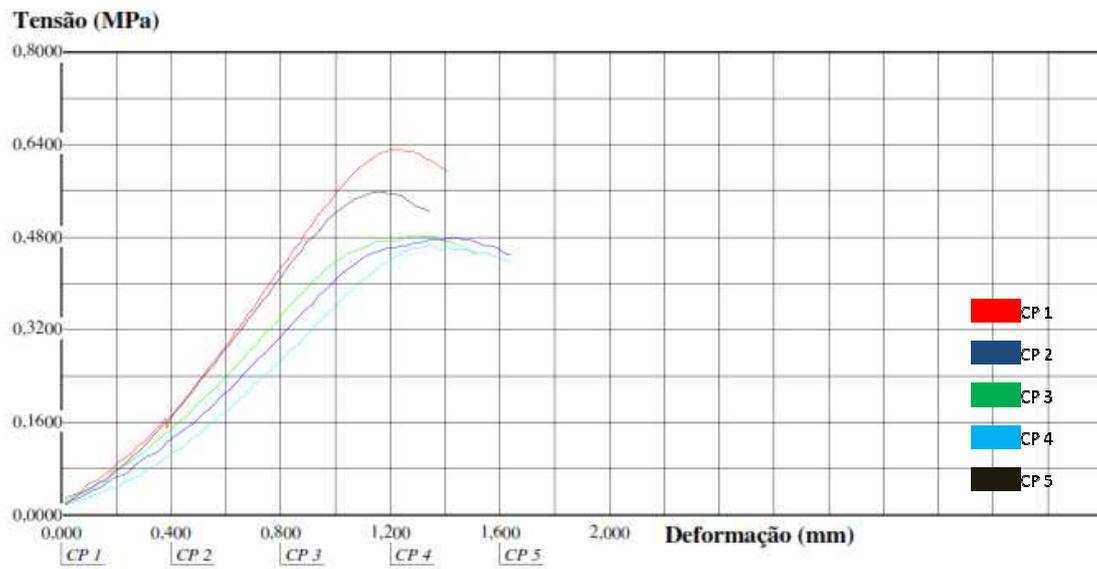


Figura 4.5 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 100% eucalipto



**Figura 4.6 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 50/50 - coque/
bagaço**

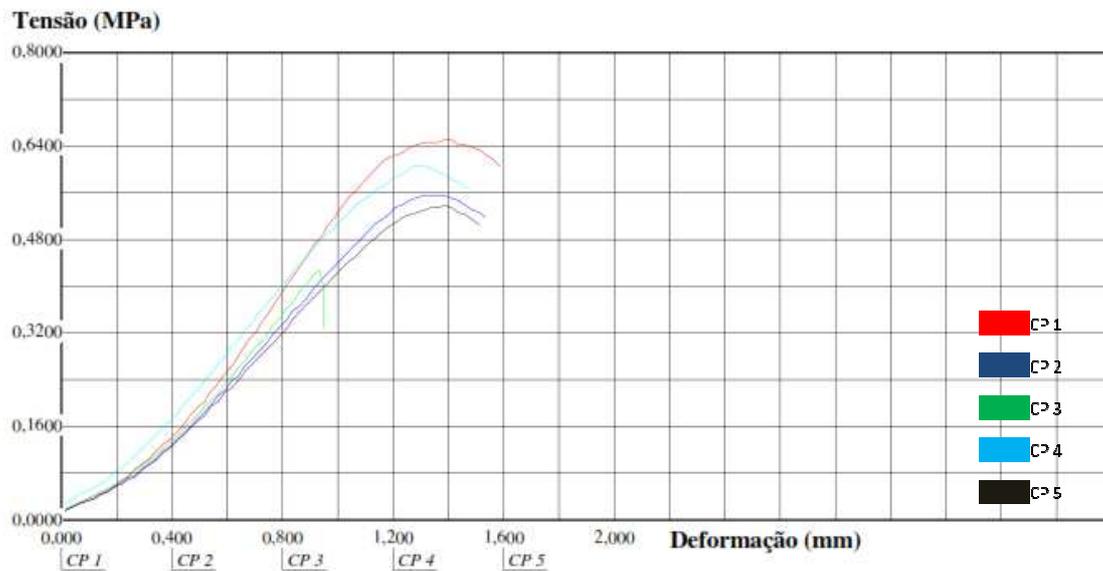


Figura 4.7 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 25/75 – coque/bagaço

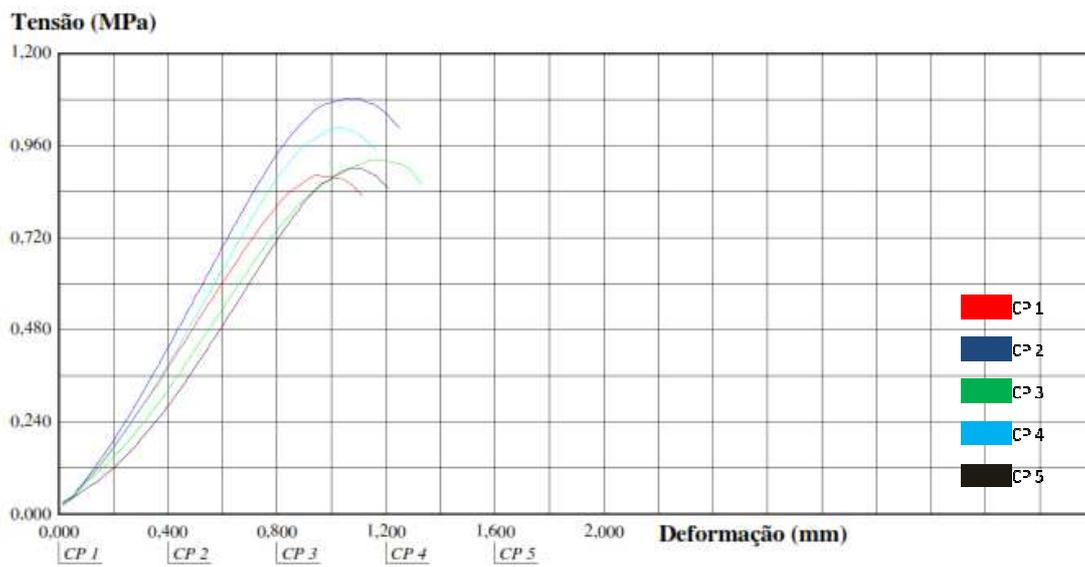


Figura 4.8 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 50/50 – coque/eucalipto

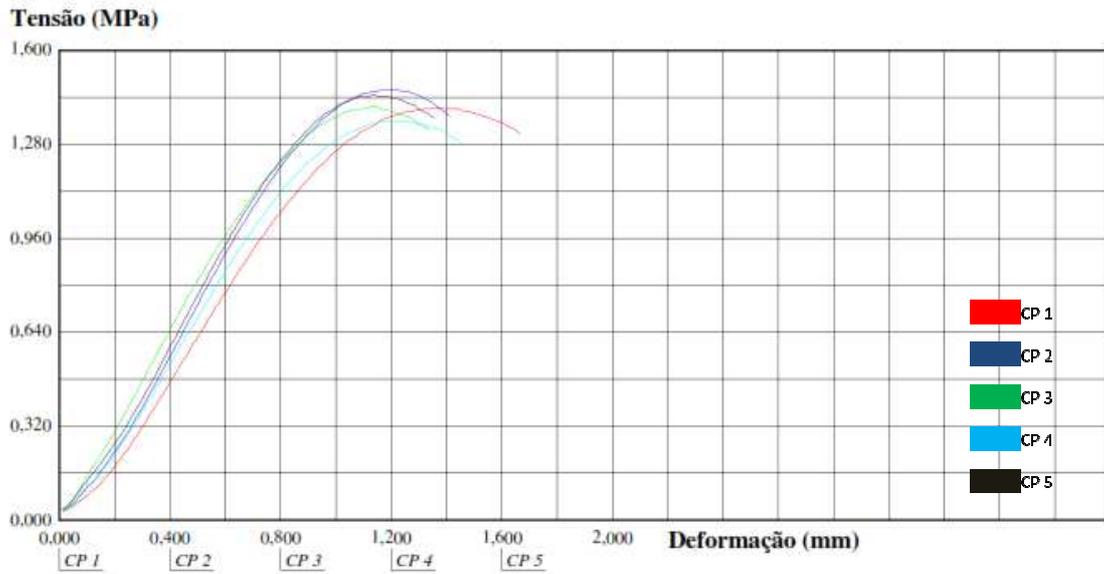


Figura 4.9 – Ensaio de resistência a compressão diametral: 25/75 – coque/eucalipto

As tabelas de 4.1 a 4.7 contêm os valores dos resultados encontrados para os ensaios de compressão diametral.

Tabela 4.1 – Resultados compressão diametral briquete 100% Eucalipto

Briquete 100% Eucalipto			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	105,33	1,23	1,21
CP 2	104,35	1,28	1,20
CP 3	93,01	1,26	1,04
CP 4	102,73	1,29	1,18
CP 5	110,84	1,27	1,29
Média	103,25	1,27	1,18
Desvio Padrão	6,49	0,02	0,09

Tabela 4.2 – Resultados compressão diametral briquete 25/75 – Coque/Eucalipto

Briquete 25/75 - Coque/Eucalipto			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	72,26	1,05	0,95
CP 2	72,59	1,08	0,95
CP 3	70,65	1,11	0,95
CP 4	66,44	1,08	0,87
CP 5	69,68	1,06	0,90
Média	70,32	1,08	0,92
Desvio Padrão	2,47	0,02	0,04

Tabela 4.3 – Resultados compressão diametral briquete 50/50 – Coque/Eucalipto

Briquete 50/50 - Coque/Eucalipto			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	67,09	0,94	0,89
CP 2	78,75	1,06	1,08
CP 3	68,38	1,14	0,92
CP 4	75,84	1,02	1,01
CP 5	70,00	1,07	0,90
Média	72,01	1,05	0,96
Desvio Padrão	5,04	0,07	0,08

Tabela 4.4 – Resultados compressão diametral briquete 100% Bagaço

Briquete 100% Bagaço			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	36,62	1,22	0,42
CP 2	35,97	1,19	0,42
CP 3	37,27	1,13	0,43
CP 4	37,27	1,18	0,43
CP 5	35,97	1,16	0,41
Média	36,62	1,18	0,42
Desvio Padrão	0,65	0,03	0,01

Tabela 4.5 – Resultados compressão diametral briquete 25/75 – Coque/Bagaço

Briquete 25/75 - Coque/Bagaço			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	50,23	1,39	0,65
CP 2	43,75	1,31	0,56
CP 3	33,70	0,94	0,43
CP 4	49,26	1,27	0,61
CP 5	43,10	1,39	0,54
Média	44,01	1,26	0,56
Desvio Padrão	6,58	0,19	0,08

Tabela 4.6 – Resultados compressão diametral briquete 50/50 – Coque/Bagaço

Briquete 50/50 - Coque/Bagaço			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	47,96	1,21	0,63
CP 2	36,30	1,42	0,48
CP 3	36,62	1,27	0,48
CP 4	35,33	1,34	0,47
CP 5	42,13	1,15	0,56
Média	39,67	1,28	0,54
Desvio Padrão	5,34	0,11	0,07

Tabela 4.7 – Resultados compressão diametral briquete 100% Coque

Briquete 100% Coque			
Corpo de Prova	Força Máxima (Kgf)	Deformação Máxima (mm)	Tensão Máxima (MPa)
CP 1	15,23	0,19	0,24
CP 2	13,94	0,22	0,22
CP 3	13,94	0,23	0,22
CP 4	14,26	0,20	0,23
CP 5	13,29	0,21	0,21
Média	14,13	0,21	0,22
Desvio Padrão	0,71	0,02	0,01

A tabela 4.8 refere-se a uma tabela geral que contém os resultados médios para força, deformação e tensão máximas encontrados para todos os briquetes.

Comparando-se os resultados encontrados para os briquetes de composição 100% de somente um material, nota-se que para as três variáveis analisadas a tendência decrescente de valores é: eucalipto, bagaço de cana-de-açúcar e coque. Desta forma, como os briquetes compostos de 100% de coque de petróleo apresentaram os menores valores, a princípio, esperava-se que quanto maior fosse a concentração de coque nos briquetes menor seriam os valores de força, deformação e tensão máximas.

Com o intuito de facilitar a visualização e a avaliação dos resultados encontrados, os valores de força máxima, deformação máxima e tensão máxima encontrados para os briquetes foram esboçados em gráficos. As figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os gráficos obtidos, respectivamente, para força, deformação e tensão máximas.

Para os briquetes de composições de coque e eucalipto pode-se verificar que a adição de coque causou uma tendência de diminuição dos valores de força, deformação e tensão quando estes são comparados com o valor encontrado para o briquete 100% eucalipto. A força máxima apresentou uma queda da ordem de 31,25% e 30,20% para as composições 25/75 e 50/50 coque/eucalipto, respectivamente. Para deformação a diminuição foi de 15,79% e 17,32%, e para a tensão da ordem de 22,03% e 18,64% para as mesmas composições citadas anteriormente.

Para os briquetes compostos de coque e bagaço de cana-de-açúcar o comportamento nos testes de compressão diametral foi oposto ao esperado inicialmente. A adição de coque causou um aumento nos valores de força, deformação e tensão máximas.

Os briquetes de composição 25/75 e 50/50 coque/bagaço de cana apresentaram, respectivamente, aumentos da ordem de 20,18% e 8,37%. A

deformação apresentou aumentos da ordem de 6,78% e 8,47%, já para a tensão os aumentos foram de 33,33% e 28,57%.

Analisando-se o comportamento geral de todas as composições de briquetes, em relação às propriedades determinadas, pode-se supor que a adição de coque aos briquetes contendo fibras de eucalipto tende a diminuir a resistência mecânica dos briquetes. Porém, a adição de coque aos briquetes formados com fibras de bagaço de cana tende a aumentar a resistência mecânica. Talvez, estas tendências estejam relacionadas às propriedades de adesão entre as partículas e compatibilidade dos materiais utilizados, já que foram utilizadas as mesmas condições de moldagem e umidade para os materiais. Provavelmente, estejam ocorrendo interações físicas de maior intensidade entre coque e fibras de bagaço em comparação com os briquetes formados com coque e fibras de eucalipto.

No entanto, ao se considerar a aplicação de uma análise estatística dos valores citados nas tabelas de 4.1 a 4.7, os resultados para as composições 25/75 e 50/50 coque/fibras vegetais são similares.

Tabela 4.8 – Resultados médios de compressão diametral para composições de briquetes

	TABELA GERAL DE ENSAIO DE COMPRESSÃO DIAMETRAL PARA BRIQUETES						
	100% Eucalipto	Coque/Eucalipto o 25/75	Coque/Eucalipto o 50/50	100% Bagaço	Coque/Bagaço o 25/75	Coque/Bagaço o 50/50	100% Coque
Força Máxima (Kgf)	103,25	70,39	72,01	36,62	44,01	39,67	14,13
Deformação Máxima (mm)	1,27	1,07	1,05	1,18	1,26	1,28	0,21
Tensão Máxima (MPa)	1,18	0,92	0,96	0,42	0,56	0,54	0,22

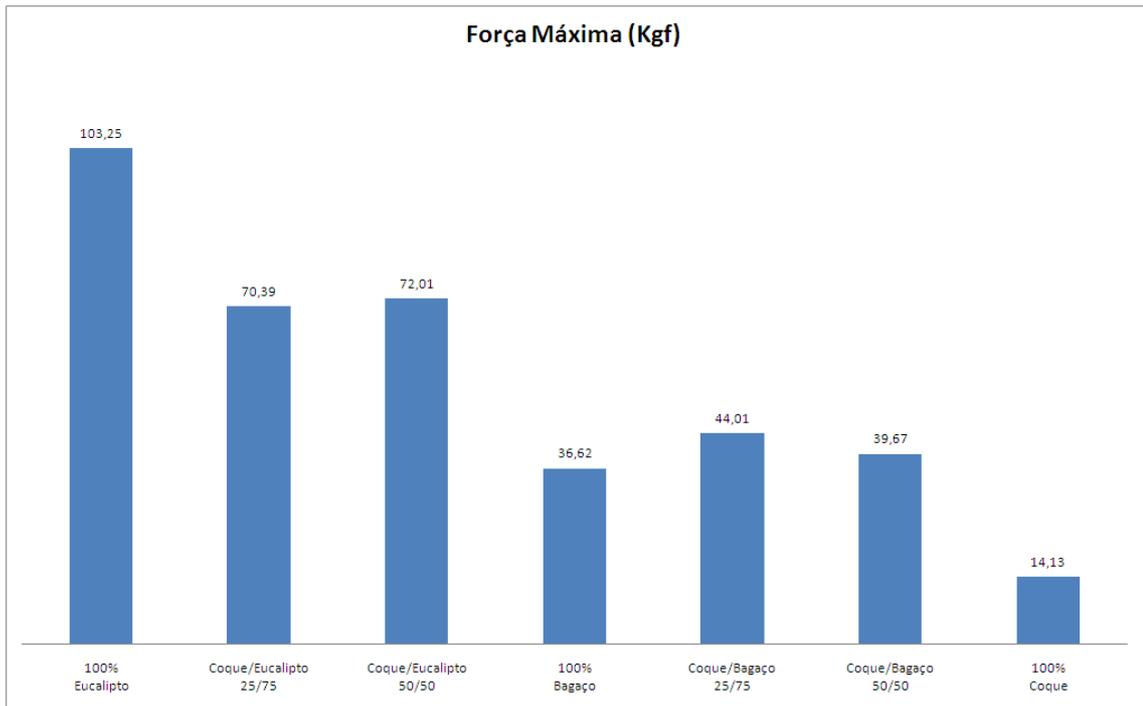


Figura 4.10 – Comparativo dos resultados de força máxima entre composições de briquetes

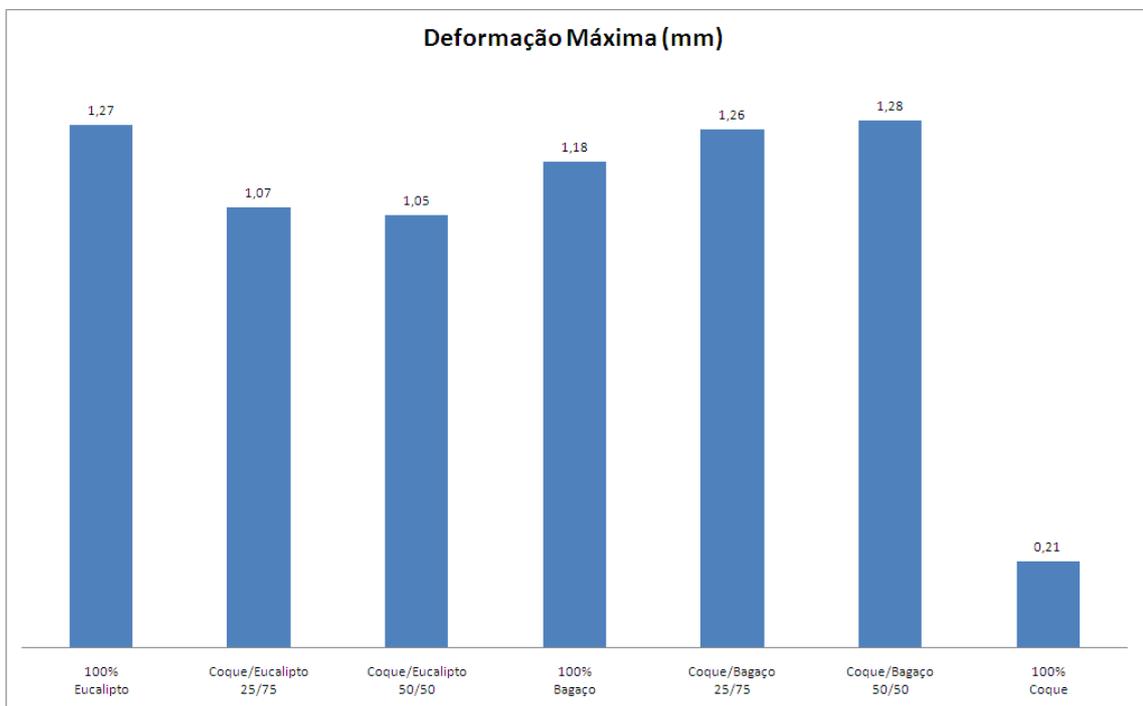


Figura 4.11 – Comparativo dos resultados de deformação máxima entre composições de briquetes

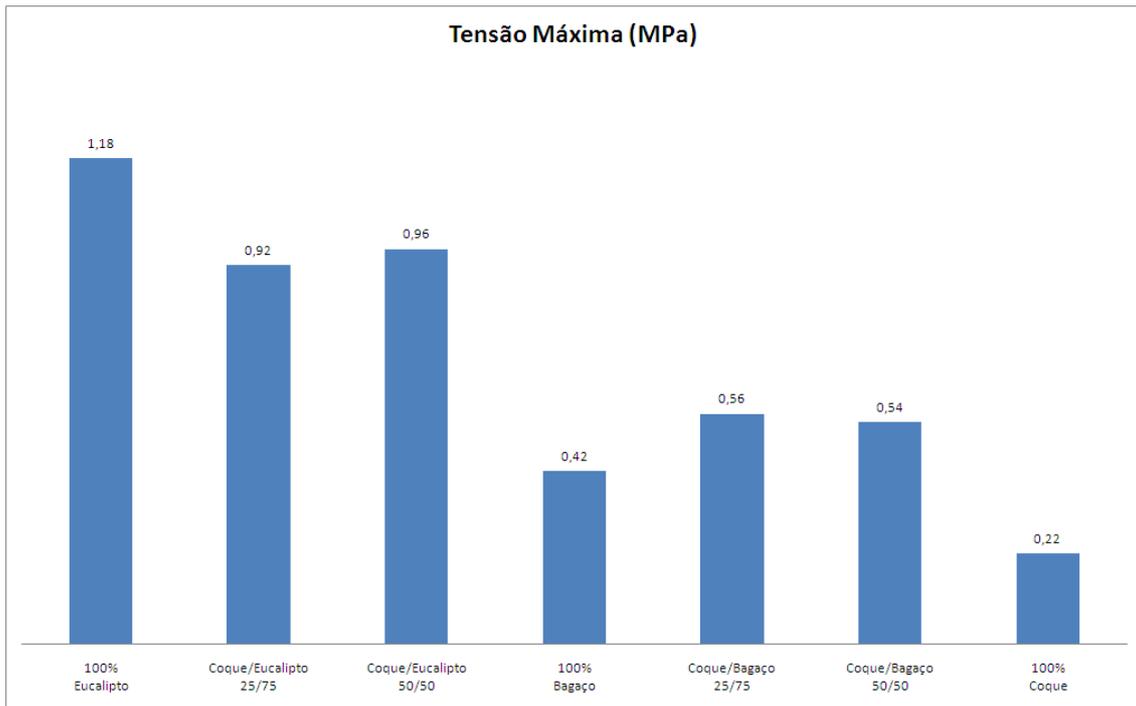


Figura 4.12 – Comparativo dos resultados de tensão máxima entre composições de briquetes

4.4 Referências

BUEST, G. T. Estudo da Substituição de Agregados Miúdos Naturais por Agregados Miúdos Britados em Concretos de Cimento Portland. 2006. 68f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CHRISOSTOMO, W. *Estudo da Compactação de Resíduos Lignocelulósicos Para Utilização Como Combustível Sólido*. 2011. 46p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2011.

Conclusões

Avaliando-se os resultados obtidos pode-se concluir que foram atingidos os dois objetivos principais deste trabalho, ou seja, produção de briquetes compostos de coque de petróleo e fibras vegetais, e aumento do poder calorífico dos mesmos.

Tanto os briquetes de composição 25/75 quanto os de composição 50/50 coque/fibras vegetais, apresentaram aumento nos valores de poder calorífico superior (PCS) em relação aos briquetes 100% biomassa. A faixa de valores de poder calorífico superior encontrada para os briquetes compostos de coque e fibras vegetais, 5.513 a 5.766 kcal.kg⁻¹, pode ser comparada a faixa encontrada para um combustível mineral utilizado em indústrias conhecido por antracito. O antracito apresenta valores de poder calorífico superior da ordem de 5.500 a 6500kcal.kg⁻¹ e isso pode resultar em uma melhor aceitação dos briquetes compostos de coque e fibras vegetais por parte das indústrias que utilizam o antracito como fonte geradora de energia.

Os briquetes compostos de coque e fibras vegetais como, por exemplo, o de composição 25/75, podem ser uma opção de utilização para melhorar o poder energético desse combustível. Os briquetes compostos de 50/50 coque e fibras vegetais apresentam uma redução de 50% no consumo de uma fonte esgotável e de maior potencial poluidor, ou seja, o coque de petróleo.

A fragilidade dos briquetes produzidos é um ponto que deve ser levado em consideração quando avalia-se sua utilização em processos industriais. Em alguns casos, os briquetes serão estocados e transportados várias vezes antes do uso final. Porém, o problema da baixa resistência mecânica dos briquetes compostos de coque e fibras vegetais, provavelmente, poderá ser resolvido, em estudos futuros, utilizando-se ligantes ou agentes de adesão que podem auxiliar na compactação e no aumento da resistência mecânica dos mesmos.

Trabalho Apresentado em Congresso

FRANCO, A. J.; FLORES, W. P; YAMAJI, F. M.; PAIVA, J. M. F. “Composições de coque de petróleo e eucalipto na produção de briquetes”; 4º Congresso Internacional de Bioenergia, Pinhais-PR, 2009.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Realização de compactações utilizando-se das mesmas proporções de misturas e matérias-primas, porém variando-se alguns parâmetros de processo como, por exemplo, a umidade, as granulometrias e as forças de compactação durante a moldagem.

Estudo das interações físicas e químicas entre o coque de petróleo e as fibras vegetais com o intuito de se explicar o aumento e/ou a diminuição da resistência mecânica dos briquetes.

Utilização de temperatura e/ou ligantes durante a compactação com o intuito de se melhorar, posteriormente, as propriedades mecânicas dos briquetes.