

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
SCPG - PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

Tese de Mestrado

Síntese de Novos Combustíveis Sólidos a Partir de
Resíduos Agroflorestais e Possíveis Contribuições
no Cenário Energético Brasileiro.

Autor: Guilherme Bezzon *1469*
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo *t.*

Aprovado por:

Carlos Alberto Luengo

Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo
Presidente

Luis Augusto Barbosa Cortez

Electo Eduardo Silva Lora
Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora

Campinas, 13 de janeiro de 1994

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR *Guilherme Bezzon*

Nº Public. FEM: 05/94

E APROVADA PELA

COMISSÃO JULGADORA EM 13/01/94

Carlos Alberto Luengo
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA
ÁREA INTERDISCIPLINAR DE PLANEJAMENTO
DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**Síntese de Novos Combustíveis Sólidos a Partir de
Resíduos Agroflorestais e Possíveis Contribuições
no Cenário Energético Brasileiro.**

Por: Guilherme Bezzon

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Luengo

Trabalho apresentado à Comissão de
Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia - UNICAMP
como parte dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Campinas, janeiro de 1994.



Aos meus pais

José António e

Marilsy

pelo apoio total aos meus atos.....

à Lara

pelo incentivo e compreensão

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Carlos A. Luengo, pela orientação e incentivos concedidos na realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo auxílio-bolsa fornecido.

Aos professores Luis A. B. Cortez e Electo Silva Lora, que participaram da banca examinadora, além de sugerirem importantes correções ao trabalho.

Ao Dr. Júlio F. Happ, pela leitura prévia da dissertação e oportunas sugestões.

Aos amigos do Laboratório de Combustíveis Alternativos, que me auxiliaram e me apoiaram nas dificuldades surgidas durante as etapas que realizei no laboratório: Gérson, Cláudia, Dílcio, Alberto, João ~~Paulão~~, José Luz, Jeverson, Karine, Coutinho, Edson e Ricardo.

Aos professores e colegas do curso de Planejamento de Sistemas Energéticos e às secretárias Márcia, Estér, Denise e Vera, pelas facilidades administrativas proporcionadas.

Aos colegas de graduação que comigo conviveram e participaram de mais essa etapa em minha vida.

E finalmente a todas as pessoas que me apoiaram e que me dão forças para continuar lutando por um ideal.

Obrigado a todos !

Índice Geral

Agradecimentos

Resumo

Abstract

Lista de figuras e tabelas

	pg.
I. Introdução.	1
I.a. Alternativas na substituição de combustíveis sólidos no mercado energético brasileiro.	1
I.b. Objetivos.	5
II. Principais resíduos agroflorestais brasileiros.	6
II.a. Disponibilidade e caracterização dos principais resíduos agroflorestais brasileiros.	6
II.b. Principais conversões energéticas utilizáveis para os resíduos agroflorestais.	20

III. Compactação de resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.	32
III.a. Principais métodos de compactação utilizáveis para resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.	33
i. Peletização.	33
ii. Enfardamento.	33
iii. Briquetagem.	34
III.b. Briquetagem de resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.	34
i. Definição.	34
ii. Histórico.	34
iii. Processos.	35
 IV. Descrição experimental.	 43
IV.a. Descrição dos ensaios laboratoriais de briquetagem de resíduos agroflorestais.	43
IV.b. Equipamentos utilizados para os ensaios laboratoriais.	44
IV.c. Métodos de caracterização dos insumos utilizados e produtos obtidos.	51
IV.d. Descrição e análise dos ensaios realizados.	55
i. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima o bagaço de cana.	55
ii. Preparação de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima o bagaço de cana pré-processado.	64

iii. Preparação de briquetes de bagaço de cana utilizando temperaturas do início da pirólise.	66
iv. Pirólise do bagaço "in natura" e posterior briquetagem a quente com a adição de ligante (piche vegetal).	68
v. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima a palha de cana.	75
vi. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima serragem derivada de indústria madereira.	79
vii. Análise dos resultados do PCS e densidade.	82
V. Aspectos técnico-econômicos.	87
V.a. Estimativa da viabilidade econômica de uma planta de briquetagem de bagaço de cana.	87
V.b. Preços de mercado de produtos compactados derivados de resíduos agroflorestais.	98
V.c. Descrição de mercados potenciais para o consumo e principais usos de briquetes de resíduos agroflorestais.	100
VI. Conclusões finais.	104
VI.a. Equipamentos utilizados.	104
VI.b. Preparação e caracterização dos briquetes produzidos	105
VI.c. Análise técnica-econômica-ambiental.	106
VII. Referências bibliográficas.	108

Resumo.

As atividades agroindustriais e de extração de madeira em áreas nativas ou reflorestadas no Brasil produzem grandes quantidades de resíduos vegetais juntamente com o produto principal desejado. Geralmente esses resíduos não possuem uma utilização definida, sendo na maioria dos casos queimados ou deixados no próprio campo, caracterizando-se assim um desperdício energético que poderia ser utilizado com maior racionalidade. Por outro lado, em algumas regiões do país há uma grande demanda de combustíveis sólidos, principalmente para uso energético (lenha e carvão vegetal) e siderúrgico (carvão vegetal e coque importado, utilizados como fonte de carbono redutor na produção de aços).

Este trabalho estuda a necessidade da viabilização do uso racional dos resíduos agroflorestais visando substituir em parte a lenha, carvão vegetal e coque, buscando reduzir assim, o índice de exploração de matas nativas e importação de produtos.

O trabalho experimental desenvolve-se através de tratamentos a altas pressões e temperaturas de resíduos agroflorestais de relativa importância econômica para o país, utilizando-se equipamentos apropriados para estes fins. Serão produzidos briquetes através de compactação e pirólise com posterior caracterização para se obter as principais propriedades como energéticos, efetuando-se comparações com outros produtos. Esses tratamentos visam reduzir problemas apresentados por esses materiais que são: baixa densidade, alta umidade, baixo poder calorífico e ausência de formato geométrico definido.

Será desenvolvida também, uma avaliação preliminar dos resíduos disponíveis para transformação nos setores de açúcar e álcool, siderurgia, madeireiras e outros, além de uma estimativa de custos de transformação e potencial de mercado nos setores respectivos.

Abstract.

Agricultural activities and wood exploitation either in natural or planted forests in Brazil, generate a large amount of vegetables residues, along with the main product. Usually these residues have not a correct use, being in most of the times either burned or abandoned on the field, becoming this way an energy waste, that should be used more conveniently, otherwise, in some regions of the country there is a large consumption of solid fuels, specially for domestic use (wood and charcoal) and steel manufacturing (charcoal and imported coke, as a carbon source) purposes.

This work aims to study the possibility of making feasible the rational use of agricultural and forest residues, so wood, charcoal, and coke would be partially replaced, looking for, the decrease of the exploitation rate of natural forests and importation of similar products.

The experimental work was developed using high pressures and temperatures for processing of agricultural and forestry residues, which have some economic importance for the country, by using the appropriate equipment. Briquettes were prepared through compaction and pyrolysis for future analysis to obtain their main energy properties, and comparing with other fuels. These processes aim decreasing the most important problems arising by the utilization of residues namely: low density and calorific value, high moisture, and lack of geometrical form.

It will be also shown, a first approach to evaluate the available residues for processing in sugar and alcohol, steel manufacturing, wood transformation sectors, and so on, as well as processes estimated costs and potential markets in those areas.

Listas de Figuras.

Fig. 1. Evolução do consumo anual da lenha, carvão vegetal e coque redutor importado de 1976 a 1991.	2
Fig. 2. Preços médios de lenha e carvão vegetal praticados no Estado de São Paulo de 1988 a 1993.	3
Fig. 3. Gráfico do PCI do bagaço em função da umidade b.u.	9
Fig. 4. Esquema do ciclo da bomba de calor.	25
Fig. 5. Esboço de extrusora termoplástica para biomassas.	36
Fig. 6. Esquema da prensa de cilindros giratórios com iguais diâmetros.	41
Fig. 7. Esboço do sistema de briquetagem a quente.	45
Fig. 8. Gráficos Temperatura x Tempo no interior da célula de pressão, para a aferição do sistema de briquetagem a quente.	46
Fig. 9. Esboço do sistema de pirólise com taxas de aquecimento controladas e atmosfera inerte (nitrogênio).	48
Fig. 10. Gráficos Temperatura x Tempo da caixa de carbonização sem amostra para aferição do sistema de pirólise.	50
Fig. 11. Esboço do calorímetro isoperibólico utilizado nos ensaios para determinação do PCS.	53

Fig.12. Diagrama termogravimétrico do bagaço de cana realizado a taxas de aquecimento de 4°C/min.	57
Fig. 13. Gráfico Temperatura x Tempo da amostra coletados no interior da caixa de carbonização.	62
Fig. 14. Fluxograma do processo de produção de piche e carvão a partir da pirólise do bagaço de cana.	71
Fig. 15. Gráfico do PCS dos briquetes de bagaço de cana em função da temperatura de briquetagem.	82
Fig. 16. Gráfico do PCS dos briquetes de serragem, bagaço e palha de cana compactados a 250°C.	83
Fig. 17. Gráfico dos briquetes pirolisados de serragem, bagaço e palha de cana a taxas de aquecimento de 2°C/min e temperatura final de pirólise de 400°C.	84
Fig. 18. Variação da densidade do briquete em função da temperatura e pressão de briquetagem nos ensaios do ítem i.	85
Fig. 19. Secador "Flash Dryer".	93
Fig. 20. Preços de mercado do bagaço "in natura", do Bagatex e dos briquetes de serragem de 1988 a 1993.	99

Lista de Tabelas.

Tab 1. Produção de carvão vegetal, lenha e madeira em toras de florestas nativas e de reflorestamento por região do país em 1989.	4
Tab. 2. Produção de matéria seca por área plantada por ano de algumas espécies de gramíneas.	13
Tab. 3. PCI do Capim Elefante em função da umidade.	14
Tab. 4. Propriedades físico-químicas de alguns resíduos agroindustriais.	18
Tab 5. Comparação da composição e poder calorífico de um carvão vegetal de eucalipto pirolisado a 500°C e a biomassa de origem.	21
Tab. 6. Principais conversões energéticas utilizáveis para resíduos agroflorestais.	30
Tab. 7. Parâmetros dos ensaios para aferição do sistema de pirólise com taxas de aquecimento controladas e atmosfera inerte.	49
Tab. 8. Temperatura de deformação e fusão das cinzas de alguns resíduos agroflorestais	52

Tab. 9. Parâmetros dos ensaios de briquetagem do bagaço de cana e umidade (b.u.) e densidade geométrica dos briquetes produzidos.	59
Tab. 10. Análise imediata (b.s.), PCS e % aumento do PCS dos briquetes em relação ao bagaço de cana original.	61
Tab. 11. Parâmetros utilizados para a pirólise dos briquetes de bagaço de cana.	62
Tab. 12. Balanço de massa da pirólise dos briquetes de bagaço de cana.	63
Tab. 13. Análise imediata, densidade média (b.s.), PCS e % aumento do PCS em relação ao bagaço original dos briquetes pirolisados de bagaço de cana.	63
Tab. 14. Parâmetros utilizados e resultados obtidos nos ensaios de briquetagem do bagaço de cana pré-tratado.	66
Tab. 15. Parâmetros utilizados e resultados obtidos nos ensaios de briquetagem do bagaço de cana a temperaturas do início da pirólise.	67
Tab. 16. Caracterização do piche utilizado como ligante.	69
Tab. 17. Parâmetros utilizados e propriedades do carvão obtido nos ensaios de pirólise de bagaço de cana seco.	70

Tab. 18. Parâmetros utilizados na briquetagem do carvão de bagaço com piche como ligante.

73

Tab. 19. Análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e % de aumento do PCS em relação ao bagaço original dos briquetes de carvão de bagaço e piche vegetal descritos na tab. 18.

74

Tab. 20. Análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e % aumento do PCS em relação à palha original dos ensaios de briquetagem a quente da palha de cana.

77

Tab. 21. Análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e % de aumento do PCS em relação à palha original dos briquetes de palha de cana produzidos a 250°C e 25 MPa e pirolisados a taxa de aquecimento de 2° C/min com temperatura final de 400°C.

78

Tab. 22. Análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e aumento do PCS em relação à serragem original dos briquetes produzidos com serragem.

80

Tab. 23. Análise imediata (b.s.), densidade média e PCS dos briquetes de serragem produzidos a 250°C e 25 MPa e pirolisados a taxa de aquecimento de 2° C/min com temperatura final de 400°C.

81

Tab. 24. Calor necessário à secagem do bagaço de cana em função da umidade remanescente.

94

Tab. 25. Principais consumidores de lenha, carvão vegetal e coque mineral como fonte energética ou redutor siderúrgico.

101

I. Introdução.	1
<i>I.a. Alternativas na substituição de combustíveis sólidos no mercado energético brasileiro.</i>	1
<i>I.b. Objetivos.</i>	5

I. Introdução.

I.a. Alternativas na Substituição de Combustíveis Sólidos no Mercado Energético Brasileiro.

Os combustíveis sólidos tradicionalmente sempre foram uma fonte energética de grande importância na história do homem. A lenha é utilizada desde os períodos pré-históricos enquanto que os carvões vegetal e mineral foram utilizados em grande escala na revolução industrial durante os séculos **XVIII** e **XIX**. Já no século **XX**, ao lado desses combustíveis sólidos tradicionais, novas formas de energia tomaram grandes proporções em termos de consumo como os derivados de petróleo, energia hidráulica e nuclear [1].

Dentre os combustíveis sólidos renováveis a lenha e o carvão vegetal apresentam números relativamente importantes em termos de consumo, principalmente nos setores residencial e industrial onde a lenha aparece com respectivamente 28% e 8% do consumo total do setor e o carvão vegetal um valor de 7% do consumo no setor industrial onde ao lado do coque redutor importado é utilizado principalmente em siderúrgicas como redutor na produção do aço [2]. A fig. 1 apresenta uma evolução do consumo anual da lenha, carvão vegetal e coque redutor importado em tonelada equivalente de petróleo (tEP) de 1976 a 1991 [2].

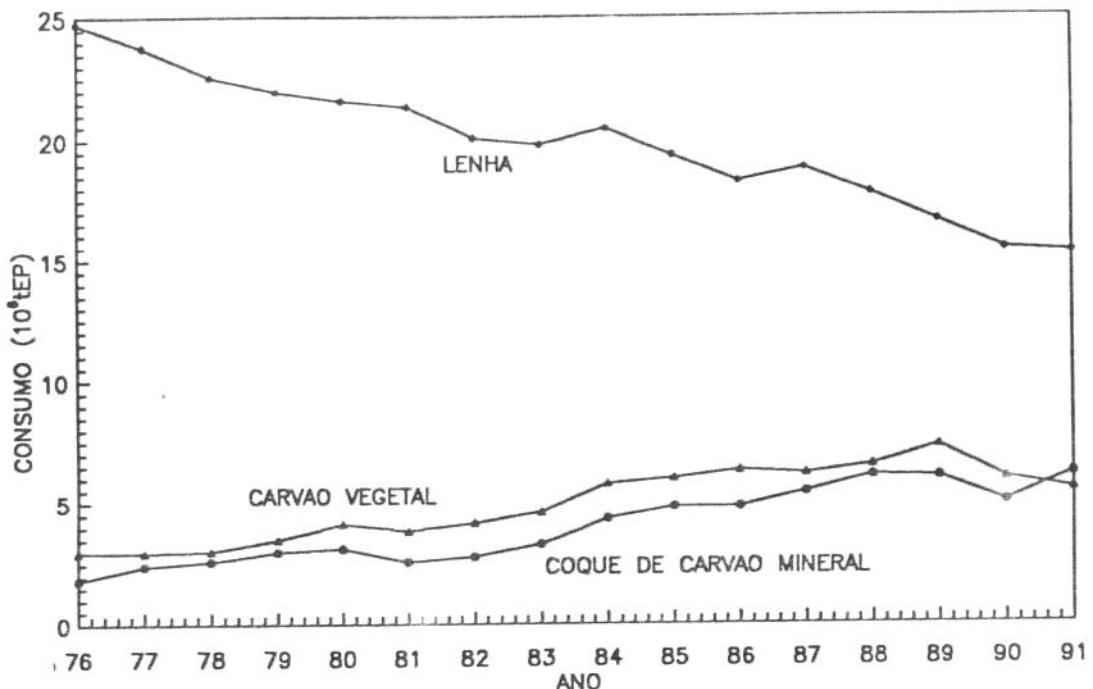


Fig. 1. Evolução do consumo anual da lenha, carvão vegetal e coque redutor importado de 1976 a 1991 [2].

Devido às maiores dimensões de seu parque industrial, a região sudeste apresenta-se como o maior consumidor e produtor de lenha e carvão vegetal, o que leva à exploração da madeira em áreas próximas aos grandes centros. Essa retirada contínua de madeira durante anos, consumiu grande parte da mata nativa, principalmente dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, obrigando-se a buscar madeira nativa em lugares distantes, situação que resulta em maiores custos financeiros e prejuízos ecológicos para as regiões de exploração. A fig. 2 mostra uma evolução dos preços médios de lenha e carvão vegetal praticados no Estado de São Paulo a partir de 1988 [3]. Verifica-se que o preço do carvão vegetal acompanha o preço da lenha e que houve uma ligeira tendência de aumento do preço em função do tempo.

A oscilação observada, onde há uma redução nos preços entre os meses de setembro a março, é devida à época de chuvas, onde há uma menor atividade na exploração de matas nativas, ocorrendo dessa forma, uma redução no preço da lenha e consequentemente do carvão vegetal.

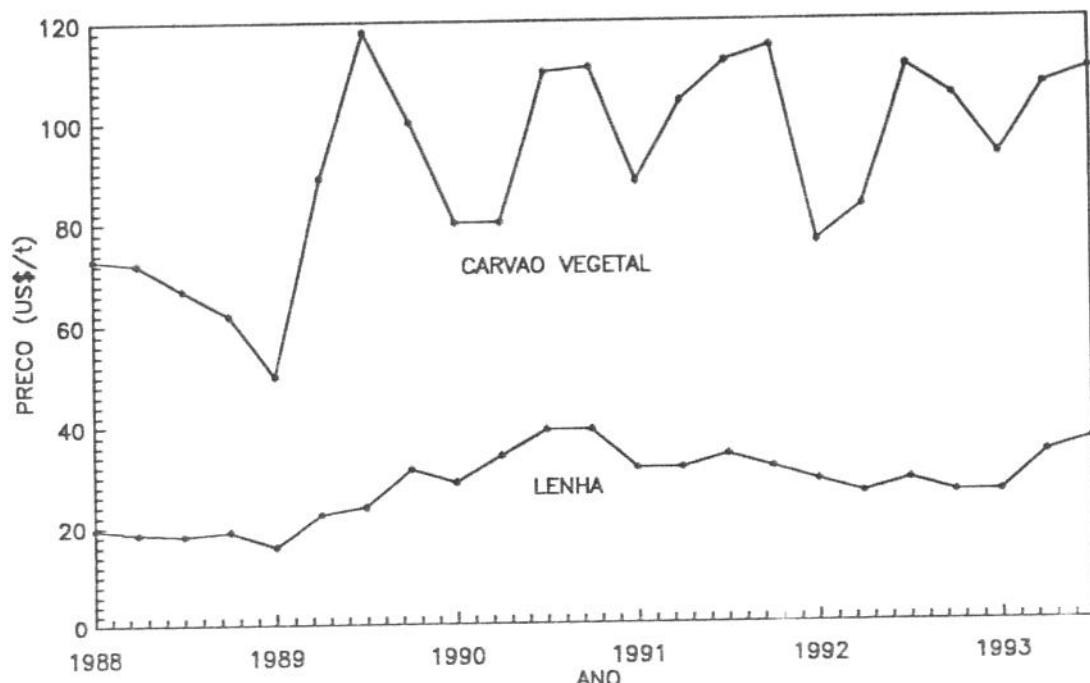


Fig. 2. Preços médios de lenha e carvão vegetal praticados no Estado de São Paulo de 1988 a 1993 [3].

Uma das soluções para o problema está no reflorestamento, onde se cultivam florestas energéticas em áreas já desmatadas com árvores que apresentam um ciclo de corte curto (entre 7 e 10 anos) em comparação com uma floresta nativa que possui um tempo de regeneração muito longo (entre 50 e 80 anos) [4]. O reflorestamento já é praticado em áreas da região sudeste, mas ainda não em suficientes proporções para substituir totalmente a exploração de matas nativas.

A tab. 1 mostra a produção de carvão vegetal, lenha e madeira em tora de florestas nativas e de reflorestamento por região do país no ano de 1989 [5]. Verifica-se que a exploração de madeira em florestas nativas é bem maior que em áreas reflorestadas na maioria das regiões, o que causa um grave problema do ponto de vista ambiental.

Região	Carvão (10^6 t)		Lenha (10^6 t)		Madeira em tora (10^6 t)		
	Nativa	Plantada	Nativa	Plantada	Nativa	Plantada Papel e Celulose	Plantada Outros fins
Norte	0,81	-	4,95	0,01	18,52	0,56	-
Nordeste	0,50	0,09	20,90	0,24	3,05	0,57	0,07
Sudeste	1,96	1,48	6,96	5,29	0,38	5,42	2,64
Sul	0,24	0,04	8,00	3,13	2,69	6,38	2,62
Centroeste	0,81	0,28	4,14	0,54	1,03	0,12	0,05
Brasil	3,59	1,89	44,95	9,21	25,68	12,5	5,38

Tab 1. Produção de carvão vegetal, lenha e madeira em toras de florestas nativas e de reflorestamento por região do país em 1989 [5].

Outra solução viável no sentido de se diminuir a exploração de florestas é a utilização racional e eficiente de resíduos agroflorestais, sub-produtos vegetais de culturas alimentícias, agroindustriais ou de exploração de florestas, que não são utilizados diretamente como energéticos por possuirem em geral baixa densidade, alta umidade, formato geométrico indesejado e baixo poder calorífico, sendo necessários portanto, processamentos com o objetivo de aumentar a eficiência de utilização desses insumos, o que em muitos casos se torna vantajoso devido aos baixo custos de obtenção desses resíduos.

I.b. Objetivos.

1. Analisar a viabilidade da substituição dos principais combustíveis sólidos utilizados no mercado energético brasileiro (lenha, carvão vegetal e coque mineral importado) por combustíveis sólidos derivados de resíduos agroflorestais, objetivando assim, reduzir a exploração de matas nativas e importação de energéticos.
2. Realizar um banco de dados de caracterização e disponibilidade dos principais resíduos agroflorestais passíveis de utilização energética e as principais formas de conversão apropriadas para esses materiais.
3. Desenvolver metodologias de produção de novos combustíveis sólidos derivados de resíduos agroflorestais a partir de tratamentos térmicos e mecânicos realizados em equipamentos a nível laboratorial.
4. Análise dos mercados potenciais para a absorção desses novos combustíveis e estimativas de custos de produção em escala industrial.

II. Principais resíduos agroflorestais brasileiros.	6
<i>II.a. Disponibilidade e caracterização dos principais resíduos agroflorestais brasileiros.</i>	6
<i>II.b. Principais conversões energéticas utilizáveis para os resíduos agroflorestais.</i>	20

II. Principais Resíduos Agroflorestais Brasileiros.

II.a. Disponibilidade e Propriedades Físico-Químicas dos Principais Resíduos Agroflorestais Brasileiros.

Pode-se citar como sendo de importância significativa para o Brasil os seguinte sub-produtos:

- Bagaço de Cana
- Palha de Cana
- Gramíneas
- Resíduos de Madeira (galhos, folhas, casca,...)
- Resíduos agroindustriais

Disponibilidade: O problema de se verificar a disponibilidade e potencial dos resíduos agroflorestais é que dificilmente são feitas pesquisas para quantificá-los, como é feito com outros insumos energéticos, onde se quantificam recursos e reservas (petróleo, carvão mineral, gás natural,...) ou produção anual (cana-de-açúcar, culturas alimentícias,...). É necessário, portanto, em grande parte dos casos, estimar-se a disponibilidade dos resíduos. A maioria dessas estimativas podem ser consideradas de razoável aceitação quando o objetivo é obter uma ordem de grandeza do potencial real desses resíduos.

Propriedades Físico-Químicas: As principais propriedades para caracterização energética de biomassas em geral são:

Poder Calorífico: Geralmente expresso em kJ/kg, traduz a quantidade de energia liberada em um processo de combustão em determinadas condições por unidade de massa. É classificado em dois tipos:

- Poder Calorífico Superior (PCS): Poder Calorífico em base seca, onde não se leva em consideração o calor necessário à condensação da água formada em reação com o hidrogênio contido na biomassa.

- Poder Calorífico Inferior (PCI): É calculado subtraindo do PCS o calor necessário para a condensação do vapor de água formado pela reação do hidrogênio contido na biomassa. Durante a determinação do PCI deve-se levar em consideração o teor de umidade presente.

Densidade: Geralmente expressa em kg/m³, traduz a quantidade média de massa por unidade de volume. Em geral é baixa para os resíduos quando comparada com outros tipos de combustíveis, sendo um dos principais problemas de sua utilização como energético.

Composição: A determinação da composição de biomassas em geral é feito principalmente através de dois tipos de testes:

- Análise Imediata: Determinação da umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas. Pode ser calculada em base úmida - b.u..- (em relação à massa total do material) ou base seca - b.s.- (em relação à massa do material seco).

- Análise Elementar: Determinação das quantidades de C-H-O.

A seguir descreve-se uma análise da disponibilidade e propriedades físico-químicas dos resíduos agroflorestais citados anteriormente:

- *Bagaço de Cana*: O bagaço de cana é um subproduto resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar em usinas ou destilarias na produção de álcool etílico e açúcar. Pode ser considerado atualmente como o principal resíduo agrícola brasileiro, devido à expansão na produção de álcool iniciada com o Proálcool. A maior parte do bagaço produzido é utilizado na própria usina na geração de vapor para o suprimento de energia de seu parque industrial.

Não existe dado seguro da produção total de bagaço no Brasil. Sabe-se que a quantidade de bagaço é aproximadamente 30% em massa do total da cana colhida (bagaço com 50 % de umidade - b.u.) [6].

Para a safra de 1990 tem-se:

Produção brasileira: [5]

Cana-de-açúcar: 264×10^6 t

Bagaço de Cana: 79×10^6 t

Produção paulista: [6]

Cana-de-açúcar: 130×10^6 t

Bagaço de Cana: 39×10^6 t

Deve-se levar em consideração que atualmente a maior parte do bagaço produzido é utilizado na própria usina na geração de vapor para o suprimento de energia de seu parque industrial. Aproximadamente 90% do bagaço total é queimado nas caldeiras da usina para a produção de vapor de processo. Portanto o bagaço disponível efetivamente para o mercado é aproximadamente [6]:

Brasil: $7,9 \times 10^6$ t

São Paulo: $3,9 \times 10^6$ t

As propriedades físicas-químicas do bagaço são dadas abaixo:

- PCS= 17.400 kJ/kg
- PCI= 16.000 kJ/kg (seco)

São descritas na literatura algumas equações empíricas para a determinação do PCI e PCS do bagaço de cana em função da umidade e do teor de açúcar. Para a determinação do PCI a mais conhecida é a fórmula de Hugot. Na fig. 3 encontra-se o gráfico dessa equação com um teor de açúcar no bagaço $s = 4\%$:

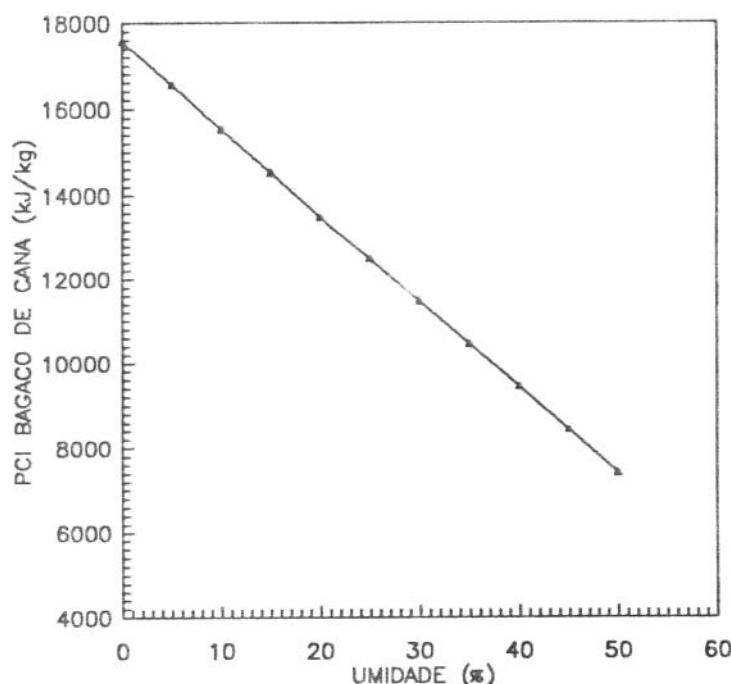


Fig.3. Gráfico do PCI do bagaço em função da umidade [7].

Algumas relações empíricas para a determinação do PCS e PCI do bagaço são descritas a seguir:

$$\text{Hugot [7]:} \quad \text{PCI} = 17.770 - 50s - 203w \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\text{PCS} = 19.230 - 50s - 192w$$

$$\text{Van der Horst [7]:} \quad \text{PCI} = 17.770 - 42s - 200w \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\text{PCS} = 19.020 - 42s - 188w$$

$$\text{Hessey [8]:} \quad \text{PCI} = 18.070 - 52s - 205w \quad (\text{kJ/kg})$$

$$\text{PCS} = 19.380 - 52s - 194w$$

$s = \% \text{ açúcar no bagaço} = 4\%$

$w = \text{umidade} (\% \text{ do bagaço - b.u.})$

Composição média:

Análise Imediata (b.s.):

Voláteis: 78,7%

Carb. Fixo: 17,3%

Cinzas: 4,0%

Análise Elementar:

C: 46,3%

H: 6,4%

O: 43,3%

Cinzas: 4%

O bagaço de cana "in natura" resultante do processo de moagem apresenta aproximadamente umidade de 50% b.u. e densidade média de 120 kg/m³.

- *Palha de Cana:* Pode-se considerar a palha de cana como sendo as folhas e ponteiros da cana-de-açúcar. Atualmente o potencial de palha de cana brasileiro é queimado para facilitar a colheita, reduzindo a zero a energia utilizada racionalmente. Algumas usinas paulistas (p. ex. São Martinho, Usina da Barra, Bonfim, Santa Adélia e outras) utilizam colhedeiras mecânicas que colhem cana verde (sem queimar), embora ainda hoje em pequeno número e proporções, sendo que poucas utilizam essa palha como energético, onde na maioria dos casos é deixada no campo e às vezes queimada após a colheita. Isto ocorre devido à falta de um programa de utilização dessa palha, embora já se iniciaram alguns estudo para o incentivo do uso racional desse insumo que dentro de pouco tempo poderá se tornar um dos resíduos de maior importância devido ao seu alto potencial. Ressalta-se como exemplo Cuba que já utiliza a palha colhida em colheitadeiras mecânicas na geração de energia para as instalações da usina e arredores [9]. Estimativas indicam que a quantidade total de palha seca é equivalente a 1,3 vezes a produção do bagaço total seco [6]. Dos dados de bagaço do ítem anterior, pode-se fazer uma avaliação da quantidade de palha de cana potencialmente disponível.

Para a safra de 1990:

Potencial disponível no Brasil:

Bagaço de cana: 40×10^6 t(seco)

Palha de cana: 52×10^6 t (seca)

Potencial disponível no Estado de São Paulo:

Bagaço de cana: 19×10^6 t(seco)

Palha de cana: 25×10^6 t (seca)

Deve-se observar que é praticamente inviável utilizar toda a palha disponível, principalmente porque uma parte é sempre perdida no campo misturada com a terra e impurezas. Foi verificado um índice de 70% de aproveitamento energético do total de palha disponível no Hawaii, Tailândia, e Austrália [6].

As propriedades físico-químicas da palha de cana é dada abaixo:

- PCS= 17.100 kJ/kg (seca)
 - PCI= 15.200 kJ/kg (10,6 % umidade - b.u.)

Composição média:

Análise Imediata (b.s.):

Análise Elementar:

Voláteis: 78,1%

C: 46.2%

Carb. Fixo: 17,3%

H: 6.1%

Cinzas: 4,3%

O: 43.4%

Cinzas: 4,3%

A densidade da palha de cana, da mesma forma que o bagaço é relativamente baixa, encontrando-se em torno de 110 a 140 kg/m³.

- *Gramíneas*: A família *Gramineae* constitui-se desde plantas rasteiras que atapetam os campos até algumas colmatoas de grande porte como o milho e bambú. As gramíneas atualmente são utilizadas principalmente como alimento para rebanho de animais, ainda sendo pequeno o seu uso energético, embora já existam alguns estudos neste sentido [10]. As principais vantagens nesta utilização são:

- o fornecimento de matéria-prima se dá o ano todo
 - as gramíneas possuem crescimento rápido devido à grande eficiência sintética em relação a outros vegetais, proporcionando assim, alta produtividade em área seca.

Dados sobre a disponibilidade total de gramíneas não são disponíveis, por ser uma cultura bastante dispersa e de difícil quantificação. Deve-se ressaltar que quando as gramíneas são cultivadas em grandes áreas diminui-se o rendimento em matéria seca devido às maiores dificuldades de monitoramento dessa cultura. Dados de produção de matéria seca por área plantada são dados na tab. 2 [11]. Ressalta-se que esses dados foram obtidos em escala experimental, em pequenas áreas e com adubação controlada.

Gramínea	Rendimento (t mat seca /ha/ano)
<i>Panicum Maximum</i> (Capim Colonião)	16,7
<i>Brachiaria Ruziziensis</i>	9,1
<i>Brachiaria Decumbens</i>	11,4
<i>Plaspalum Plicatulum</i>	9,1
<i>Brachiaria</i> (Flórida)	7,8
<i>Hyparrhenia Rufa</i>	7,4

Tab. 2 - Produção de matéria seca por área plantada por ano de algumas espécies de gramíneas [11].

obs.: Verificou-se que algumas espécies de gramíneas em condições controladas produzem maior quantidade de matéria seca por hectare por ano em comparação com a lenha, atestando assim, uma maior eficiência fotossintética das gramíneas em relação à árvores produtoras de lenha. O cultivo do capim foi realizado em pequenas áreas e com adubação controlada.

P. ex.: [11]: Capim colonião (*Panicum Maximum*): 16,7 t/ha/ano

Lenha (reflorestamento) : 11,0 t/ha/ano

Existem diversas culturas de espécies diferentes de gramíneas, a maioria direcionada para a alimentação animal. Para a utilização energética, uma das espécies que proporciona uma das maiores produções de matéria seca por hectare é o capim elefante (*Pennisetum Purpureum*). Suas propriedades físico-químicas são dadas a seguir:

$$\text{PCS} = 17.200 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{PCI} = 16.000 \text{ kcal/kg} \quad (\text{seco})$$

A tab. 3 descreve a variação do PCI do capim elefante com a umidade:

Umidade (% b.u.)	PCI (kJ/kg)
0	16.000
10	14.160
20	12.320
30	10.470
40	8.630
50	6.780
60	4.940
70	3.100
75	2.170

Tab. 3: PCI do Capim Elefante em função da umidade [11].

Composição média:

Análise Imediata (b.s.):

Voláteis: 79,11%

Carb. Fixo: 17,0%

Cinzas: 3,9%

Análise Elementar:

C: 46,1%

H: 6,8%

O: 43,2%

Cinzas: 3,9%

Densidade média: Entre 110 e 140 kg/m³

- *Resíduos de Madeira:* Os resíduos de madeira podem ser classificados em dois tipos:

- Folhas, galhos, ponteiros e cascas, que são deixados após o corte de árvores. Geralmente somente são utilizados industrialmente o caule, deixando-se de lado os outros componentes.

- Resíduos do processamento da madeira: serragem e pedaços de madeira de pequenas dimensões resultantes do processamento industrial para a produção de "commodities".

A quantificação dos resíduos derivados do aproveitamento da madeira deve ser feito através de estimativas utilizando a porcentagem de resíduos (casca, galhos, raízes e folhas) existentes em uma árvore e a produção anual de madeira brasileira, bem como o cálculo da quantidade de resíduos (serragem, lascas,...) gerados do processamento industrial de madeira em tora.

Pela tab. 1 [5] verifica-se que a produção total de madeira no Brasil em 1989 é dada pela soma das produções de lenha, carvão vegetal convertido em madeira e madeira em tora. Então:

Lenha: 54×10^6 t

Carvão convertido em madeira: $6 \times 10^6 \times 3 = 18 \times 10^6$ t

Madeira em tora: 56×10^6 t

Total: 128×10^6 t

Porcentagem dos constituintes da árvore (peso seco) [12]:

Caule: 65%

Galhos: 8%

Casca: 12%

Raízes: 10%

Folhas: 5%

obs.: As raízes não serão consideradas na estimativa por serem de difícil aproveitamento, da mesma forma que as folhas, que devem, de preferência, serem deixadas no solo, pois possuem grande quantidade de nutrientes que serão úteis para a adubação em caso de reflorestamento (aprox. 50% dos nutrientes totais da árvore) [13].

Portanto tem-se:

$$\text{Caule: } 65\% = 128 \times 10^6 \text{ t}$$

$$\text{Resíduos aproveitáveis: } 20\% = 39 \times 10^6 \text{ t}$$

$$\text{Folhas: } 5\% = 10 \times 10^6 \text{ t}$$

$$\text{Raízes: } 10\% = 20 \times 10^6 \text{ t}$$

Da produção de madeira em toras excluindo-se a utilização na indústria de papel e celulose, 20% do total é transformado em resíduos (serragem e lascas) no processamento industrial. Portanto:

$$\text{Produção de madeira em toras: } 38 \times 10^6 \text{ t}$$

$$\text{Resíduos: } 7,6 \times 10^6 \text{ t}$$

Os resíduos aproveitáveis da madeira no ano de 1989 são aproximadamente $46,6 \times 10^6 \text{ t}$. Esses resíduos geralmente são deixados no campo, ou são rejeitados no processamento da madeira.

A seguir tem-se as propriedades físico-químicas da serragem de eucalipto:

- PCS= 19.800 kJ/kg
- PCI= 13.100 kJ/kg (20% umidade - b.u.)

Composição média:

Análise Imediata (b.s.):	Análise Elementar:
Voláteis: 76,9%	C: 48,1%
Carb. Fixo: 19,0%	H: 5,7%
Cinzas: 4,1%	O: 42,1%
	Cinzas: 4,1%

A densidade se encontra entre 200 e 450 kg/m³.

Resíduos Agroindustriais: São resíduos provenientes de culturas agrícolas geralmente para a produção de alimentos. Alguns dos principais no Brasil são: casca de arroz, partes aéreas de tubérculos (mandioca, batata,...), resíduos do processamento de cítricos, resíduos provenientes de culturas cereais (milho, soja, trigo,...), hortaliças entre outros.

Da mesma forma que os resíduos da madeira, não existem dados exatos sobre a disponibilidade dos resíduos agrícolas. É necessário, portanto, realizar-se estimativas utilizando a produção agrícola [5] e a porcentagem de resíduos resultantes de cada cultura [13]. Os dados de colheitas são relativos ao ano de 1991 (safra 1990) [5].

- Casca de arroz: Corresponde a aproximadamente 30% do arroz em casca (8% umidade - b.u.) [13].

Produção de arroz em casca: $7,4 \times 10^6$ t [5]

Casca de arroz: $2,2 \times 10^6$ t

- Mandioca: 110% de resíduos (75% umidade - b.u.) sobre a massa da raiz utilizada como alimento [13]:

Produção de mandioca: 25×10^6 t[5]

Resíduos aéreos (ramas): 28×10^6 t

- Milho: 130% de resíduos (50% umidade - b.u.) sobre o grão: [13]

Produção de grãos: 21×10^6 t [5]

Resíduos: 27×10^6 t

- Soja: 240% de resíduos (30% umidade - b.u.) sobre o produto consumido:

[13]

Produção: 20×10^6 t [5]

Resíduos: 48×10^6 t

Propriedades físico-químicas de alguns resíduos agroindustriais [14]:

Resíduo	Casca de Arroz	Espiga de Milho	Caule de Algodão
PCS (kJ/kg)	13.400	15.600	17.600
Análise Imediata (b.s.)			
Voláteis (%)	60,6	80,2	70,9
Carbono Fixo (%)	19,9	16,2	22,4
Cinzas (%)	19,5	3,6	6,7
Análise Elementar			
C (%)	40,1	45,3	43,7
H (%)	6,0	7,2	5,8
O (%)	34,4	43,9	43,8
Cinzas	19,5	3,6	6,7

Tab. 4. Propriedades físico-químicas de alguns resíduos agroindustriais [14].

Os dados citados dão uma idéia da disponibilidade dos principais resíduos agroflorestais. É claro que grande parte desse potencial não possui viabilidade econômica de utilização, pois são de difícil coleta ou aproveitamento local e apresentam baixo poder calorífico, alta umidade e baixa densidade, sendo que muitas vezes parte desse material deve ser deixado no solo servindo como fertilizante para uma futura colheita, enquanto que outros podem ser utilizados como ração animal. Por outro lado algumas regiões do país podem utilizar alguns desses resíduos como energéticos, visando substituir com maior economicidade alguns combustíveis usados atualmente.

II.b. Principais conversões energéticas utilizáveis para os resíduos agroflorestais.

Em geral a utilização do resíduo agroflorestal "in natura" como combustível possui baixa eficiência energética, sendo necessário na maioria dos casos a utilização de processos industriais para tentar-se corrigir algumas propriedades apresentadas como baixa densidade, alta umidade e baixo poder calorífico. São processos utilizáveis ao tratamento de biomassas em geral, onde os mais importantes são descritos a seguir:

- Pirólise: A pirólise, ou destilação seca, é o processo pelo qual a biomassa é aquecida com taxas de temperatura controlada em ambiente fechado em ausência de agente oxidante (ar ou oxigênio). Gases, vapores d'água, líquidos orgânicos, alcatrão e principalmente carvão são os produtos resultantes do processo. A pirólise é chamada também de destilação seca, pois ocorre uma decomposição térmica da biomassa, separando-a em vários componentes. Esses componentes obtidos e suas quantidades dependem basicamente de quatro fatores: taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de residência à temperatura final e das dimensões da biomassa pirolisada. Através da variação desses parâmetros consegue-se obter produtos diferentes [15].

A evolução dos voláteis com a temperatura na maioria das biomassas se dá da seguinte forma [1]:

100→200°C: Volatilização da água presente

200→280°C: Evolução de gases de moléculas leves (CO, CO₂, H₂O_{formação}), alcatrão, (fenóis, ácidos orgânicos...), ácido acético, metanol, entre outros.

280→450°C: Hidrocarbonetos pesados, H₂, CO, CO₂.

A pirólise tem como função principal a produção controlada do carvão, onde, variando-se os parâmetros de conversão consegue-se obter carvões específicos para determinadas condições de uso. Uma das principais vantagens do carvão sobre a biomassa inicial é seu maior poder calorífico, devido principalmente à maior concentração de carbono. Como exemplo, pode-se citar um carvão obtido por pirólise a temperatura de 500°C, comparando-se sua composição e poder calorífico com a biomassa de origem:

	Composição Elementar (%)			PCS (kJ/kg)
	C	H	O	
Carvão	89,2	3,1	6,1	34.000
Biomassa Orig.	50,3	5,9	43,8	18.200

Tab 5. Comparação da composição e poder calorífico de um carvão vegetal de eucalipto pirolisado a 500°C e a biomassa de origem.

Observa-se um considerável aumento na concentração de carbono e no poder calorífico no carvão pirolisado.

- Carbonização: Quando o objetivo principal é obter somente o carvão sem grandes especificações, o método mais simples e barato é a carbonização em fornos de superfície. São fornos geralmente feitos de barro com uma porta para a entrada da biomassa seca ao ar anteriormente, sendo muito utilizados na produção de carvão siderúrgico localizados próximos aos locais de extração de madeira. Ao contrário da pirólise existe uma pequena entrada de ar necessária para parte da biomassa entrar em combustão, a fim de manter o processo de carbonização sem fonte externa de

calor, como ocorre na pirólise. Perde-se portanto, parte da energia contida para manter o processo e outra parcela pelos gases e voláteis que vão para a atmosfera.

As vantagens desse processo são seu baixo custo devido a fatores como a ausência de fonte externa de energia, mão de obra não especializada, manutenção quase nula e possibilidade de instalação dos fornos próximos ao local onde se encontra a matéria-prima, diminuindo-se despesas de transporte. A desvantagem principal é de não se poder controlar os parâmetros do processo, onde parte da biomassa e de seu conteúdo energético, através dos voláteis, não são aproveitados [16].

- Torrefação: Pode-se considerar a torrefação como sendo um processo de pré-pirólise. É um tratamento térmico da biomassa com temperaturas inferiores a 300°C e dá origem a materiais hidrofóbicos com teores de carbono fixo intermediário entre a biomassa e o carvão, apresentando níveis de umidade relativamente baixos. O material possui quantidade de voláteis alta, mantendo, portanto, o conteúdo energético propiciado por esses voláteis, com a vantagem de possuir umidade inferior, proporcionando assim maior rendimento na combustão. É interessante a torrefação de briquetes de resíduos vegetais pois a resistência mecânica desses briquetes torrefados é praticamente igual ao briquete inicial [17].

- Gaseificação: A gaseificação de biomassa é um processo de transformação da matéria sólida vegetal em gás combustível, contendo CO, H₂ e CH₄ como produtos mais importantes. O gaseificador é essencialmente um forno onde se oxida biomassa em condições controladas, tendo como meio oxidante oxigênio (ou ar) e vapor d'água.

As reações principais que se processam são [18]:



Os processos de gaseificação industrial se realizam no gasogênio ou gaseificador e podem ser classificados pela origem da fonte de energia do processo como autotérmicos (calor utilizado para as reações é provindo do próprio material a ser gaseificado) e alotérmicos (calor provém de uma fonte externa) ou pelo tipo de leito [19]:

- Leito fixo: o combustível é "empilhado", descendo gradualmente à medida em que é consumido.

- Leito fluidizado: utiliza a biomassa em partículas de pequenas dimensões (5 a 7 mm), mantidas em suspensão através da injeção do meio gaseificador (ar ou oxigênio e vapor) que passa pelo leito a uma velocidade suficiente para fluidizá-lo produzindo um bom contato sólido-gás que garante um aumento de eficiência no processo.

- Secagem: Uma das principais limitações ao uso energético da maioria dos resíduos agroflorestais é a alta umidade que determina muitas vezes um baixo poder calorífico e limita o raio em que o material pode ser transportado economicamente. Por isso, quando se deseja aumentar a eficiência energética e diminuir custos em transportes é necessário realizar a secagem desses resíduos, preferencialmente próximo ao local em que é produzido.

Os principais métodos de secagem de biomassas são descritos abaixo:

- Secagem natural: realizada deixando-se a biomassa naturalmente em superfície na qual ocorre evaporação da água de umidade. A principal vantagem é o baixo custo e as desvantagens são a dependência das condições climáticas a necessidade de grande áreas e o tempo requerido para o processo [20].
- Secagem em secadores que utilizam como meio de aquecimento gases de exaustão de caldeiras. São normalmente caldeiras de baixo rendimento, que liberam para atmosfera gases ainda em temperaturas elevadas [20].
- Secagem em secadores independentes, munidos de gerador autônomo de calor, com a função exclusivamente da secagem [20].
- Processo misto em que a secagem é realizada por gases de exaustão de caldeiras com alto rendimento, que saem a temperaturas baixas (130 a 150°C), sendo reaquecidos com calor de fonte autônoma [20].
- Secagem por fermentação: Utilizada com resíduos que contém certa quantidade de açúcares (p. ex. bagaço de cana: 1, a 4%), onde é estocado em pilhas, provocando um processo de fermentação com liberação de energia, aquecimento da pilha, facilitando a evaporação da água de umidade [20].
- Secagem por "Bomba de Calor": O sistema de bomba de calor é constituído basicamente pelos mesmos elementos de um equipamento frigorífico do tipo doméstico ou comercial e tem como finalidades aumentar a temperatura do ar ambiente pela passagem através do condensador, podendo ser utilizado em uma operação de secagem de resíduos e também reduzir a temperatura do ar ambiente ao passar pelo evaporador, ocorrendo um processo de refrigeração. Com isso, o equipamento deve ser utilizado em instalações onde deseja-se refrigerar algum produto, aproveitando-se o calor cedido do condensador para secar resíduos [21]. Um esquema do ciclo de bomba de calor é dado na fig. 4 :

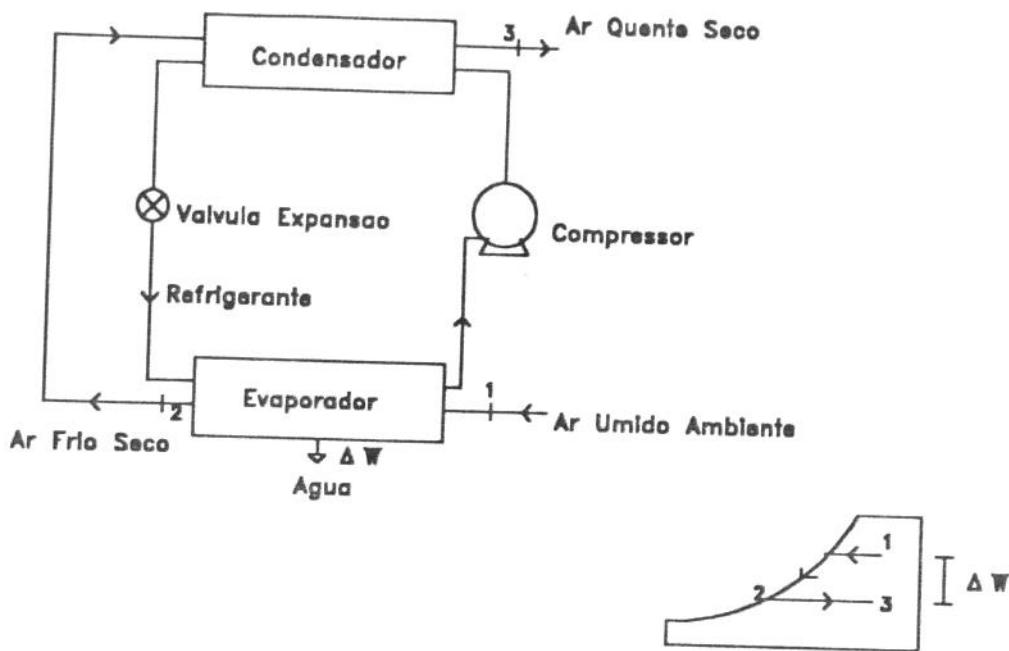


Fig. 4. Esquema do ciclo da bomba de calor.

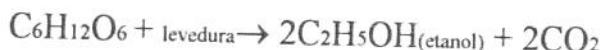
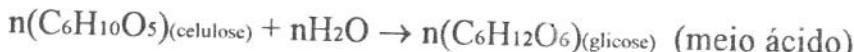
- Biodigestão: A biodigestão de resíduos agrícolas é utilizada geralmente na zona rural, onde se tenha excesso de resíduos, com o objetivo da obtenção de gás combustível (CH_4) e diminuição da atividade biológica desses materiais. Pode-se também utilizar na biodigestão resíduos industriais, restos animais, esterco e resíduos urbanos degradáveis.

A biodigestão consiste na ação de microorganismos atuando na matéria orgânica em ausência de oxigênio (biodigestão anaeróbica), promovendo a transformação da matéria orgânica em compostos estabilizados (menos complexos e portanto menos ativos), liberando o biogás, composto principalmente de monóxido de carbono e metano (combustíveis). Os compostos sólidos são posteriormente utilizados como fertilizantes. Os biodigestores mais comuns são do tipo batelada e contínuos (modelos Indiano e Chinês) e podem ser construídos em várias dimensões para diferentes capacidades.

A composição média do biogás é [22]:

CH ₄ :	54 a 70%	H ₂ :	1 a 10%
CO ₂ :	27 a 45%	CO:	0,1%
N ₂ :	0,5 a 4,5%	O ₂ :	0,1%

- Hidrólise: Basicamente o processo de hidrólise consiste no ataque da água, em meio ácido, sobre os componentes celulósicos das biomassas, os quais são convertidos em açúcares. Após a separação da lignina insolúvel, a solução de açúcares é submetida a fermentação com leveduras para a produção de etanol e dióxido de carbono. As reações básicas do processo são [23]:

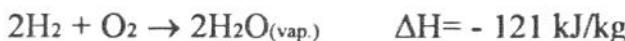


As soluções ácidas usadas podem ser da forma concentrada (HCl, H₂SO₄ concentrados) ou ácidos diluídos (H₂SO₄).

O aproveitamento de resíduos agroflorestais por via hidrolítica pode gerar produtos de grande importância. A celulose quando hidrolisada, produz principalmente glicose, que pode ser transformada em vários produtos além do álcool. A hemicelulose pelo mesmo processo é convertida principalmente em xilose, matéria-prima para processos químicos (Ex.: produção de furfural, xilitol,...). A lignina, briquetada e carbonizada em condições adequadas pode gerar um coque de excelente qualidade [20].

- *Combustão ou Queima Direta:* Processo destrutivo das moléculas carbonadas da biomassa, ocorrendo com excesso de oxigênio, resultando em aumento de temperatura e liberação de energia.

As principais reações que ocorrem com os componentes elementares (C, H) da biomassa com o oxigênio da sua própria constituição mais oxigênio do ar são [24]:



Deve-se ressaltar que a combustão é utilizada somente para a obtenção de energia térmica e não para aumentar a eficiência energética da biomassa como outros processos citados.

Um fator relevante na eficiência da combustão é o teor de umidade. Quanto maior a umidade, menor é a eficiência do processo, e menor a energia útil, pois parte da energia de combustão é utilizada para a evaporação da água presente em forma de umidade.

A queima de biomassas em caldeiras para a produção de vapor é a principal utilização industrial da combustão. Em muitos casos pode-se substituir parcialmente ou totalmente a queima de lenha ou carvão para a produção de vapor de processo em caldeiras [20].

- *Termelétricas:* A instalação de termelétricas no Brasil deve ser feita em uma primeira fase em caráter de complementaridade da rede hidrelétrica que detém 85% da produção elétrica brasileira [25]. Em breve a utilização de termelétricas deve aumentar visando a produção de energia elétrica nas seguintes circunstâncias:

- Complementaridade da rede hidrelétrica, quando esta é prejudicada por épocas de estiagens ou em horários de picos de consumo de energia. Com a limitação da capacidade de geração hidroelétrica na região sul e centro sul do país, há a necessidade de novas fontes para atender a crescente demanda.

- Instalação de pequenas centrais termelétricas em regiões onde a rede hidrelétrica não alcança.

Os principais combustíveis utilizados em termelétricas são:

- Óleo Combustível

- Óleo Diesel

- Carvão Mineral

- Gás Natural

- Biomassa

No caso de biomassa, os principais recursos utilizáveis são a lenha e os resíduos agroflorestais, sendo ainda pouco explorados para a geração em termelétricas. No Brasil existem apenas relatos de utilização da lenha (termelétrica de Samuel), que atestaram baixa eficiência energética, embora estudos nesta área estejam sendo realizados [25].

Países da Europa e Sudeste Asiático desenvolveram tecnologia e utilizam pequenas usinas termelétricas movidas a resíduos agrícolas, principalmente a palha de arroz, como é o caso das Filipinas que possui usinas com capacidade de 500 kW, processando até 5 t/h de palha de arroz [26].

- *Co-geração:* A co-geração para a geração de excedentes de energia elétrica já é prática utilizada no Brasil em algumas usinas sucroalcooleiras, indústrias de papel e celulose e madeireiras. No caso das usinas de açúcar e álcool o insumo utilizado é o bagaço de cana excedente ao necessário para o suprimento de energia da própria usina. Ressalta-se que a palha de cana representa também um grande

potencial de co-geração a ser explorado por esse setor [27]. As indústrias de papel e celulose realizam a queima de resíduos de seu processo de produção (lícor negro) enquanto que as madeireiras utilizam serragem do processamento da madeira, com o objetivo de alimentar o seu parque de máquinas. A grande dificuldade no sistema de co-geração tem sido a negociação do preço das tarifas com as concessionárias de energia elétrica. O preço pago aos produtores em geral não tem sido suficiente para compensar os custos de produção. Algumas usinas de açúcar e álcool que vendem excedente de energia elétrica para a CPFL são São Martinho, Bonfim, Santa Cruz, Santa Adélia e Vale do Rosário, todas no interior do Estado de São Paulo [28].

A co-geração apresenta-se como uma boa solução para a utilização energética de resíduos agroflorestais, pois produz energia elétrica que se caracteriza por ser uma forma de energia bastante "nobre", onde em muitos casos (como em usinas sucroalcooleiras) existem grandes facilidades para a implementação do sistema.

Através da utilização dos processos acima citados, utilizando-se como matéria-prima resíduos agroflorestais, pode-se conseguir novos produtos (combustíveis, fertilizantes, produtos químicos,...) de grande valor comercial com possibilidades de substituir produtos equivalentes atualmente no mercado.

Os processos de conversão energética fornecem diferentes tipos de combustíveis (sólidos, líquidos, gases ou energia elétrica) que devem ser utilizados para diferentes finalidades de acordo com suas características. Portanto, dependendo-se do tipo de energético requerido deve ser selecionado o processo de conversão mais adequado.

A tab. 6 fornece um roteiro para a seleção dos processos de conversão energética em função do combustível desejado.

Combustível	Processos de Conversão Utilizados
Sólido	Pirólise, Carbonização, Torrefação, Secagem
Líquido	Liquefação, Hidrólise e Fermentação
Gases	Gaseificação, Biodigestão
Energia Elétrica	Termelétricas, Co-geração

Tab. 6. Principais conversões energéticas utilizáveis para resíduos agroflorestais.

Dentre os processos de produção de um combustível, alguns são mais eficientes que outros, embora em geral, tenham custos maiores. Como exemplo pode-se citar pirólise e carbonização visando a produção de carvão: a pirólise produz carvão de melhor qualidade pois é um processo realizado em condições controladas, enquanto que a carbonização apresenta menores custos. Outro exemplo é a gaseificação e a biodigestão: a gaseificação produz gás combustível de maior poder calorífico em condições controladas de processo, enquanto que a biodigestão apresenta baixo custo. É necessário, portanto, verificar as propriedades desejadas no combustível e selecionar o melhor processo que apresente menores custos.

Dos processos de conversão energética este trabalho dará enfoque aos processos de compactação de resíduos agroflorestais e finos de carvão, visando a produção de novos combustíveis sólidos e sua implementação no mercado energético. No capítulo seguinte será feita uma descrição detalhada do processo de compactação de finos de biomassa.

III. Compactação de resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.	32
<i>III.a. Principais métodos de compactação utilizáveis para resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.</i>	<i>33</i>
<i>i. Peletização.</i>	<i>33</i>
<i>ii. Enfardamento.</i>	<i>33</i>
<i>iii. Briquetagem.</i>	<i>34</i>
<i>III.b. Briquetagem de resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.</i>	<i>34</i>
<i>i. Definição.</i>	<i>34</i>
<i>ii. Histórico.</i>	<i>34</i>
<i>iii. Processos.</i>	<i>35</i>

III. Compactação de Resíduos Agroflorestais e Finos de Carvão Vegetal

O principal problema apresentado pelos resíduos agroflorestais é a baixa densidade, o que proporciona uma baixa energia disponível por volume. A compactação tem como objetivo reduzir o volume do material aumentando sua densidade e em muitos casos diminuindo o nível de umidade o que resulta em um aumento de poder calorífico além de proporcionar um formato geométrico definido que facilita a utilização e o transporte. A viabilidade do processo está no fato desses resíduos possuirem baixo preço de comercialização e dependendo-se da metodologia e do resíduo utilizado pode-se conseguir bons produtos com propriedades comparáveis à lenha e carvões utilizados comercialmente.

O carvão vegetal, devido à sua alta friabilidade, gera finos provenientes de sua quebra durante a produção, transporte e manuseio e que equivalem em torno de 20% do total produzido [29]. Com isso essa porcentagem fica comprometida para a utilização em auto-fornos, onde são necessários carvões de alta resistência mecânica e formato geométrico definido. Dessa forma, para ser possível a utilização desses finos em siderurgias é necessário que se realize um processo de compactação, o qual dará a forma e resistência necessárias.

III.a. Principais métodos de compactação utilizáveis para resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.

Na maioria dos casos de compactação, principalmente de resíduos agroflorestais é aconselhável realizar-se um processo de pré-secagem para facilitar a prensagem diminuindo-se a energia necessária. Os principais processos de compactação são descritos a seguir:

i. Peletização: Geralmente utilizado para resíduos agroflorestais, consiste em compactar o resíduo a frio (temperatura ambiente) e sem a utilização de ligantes, com prensas hidráulicas a alta pressão. O produto final são pequenos cilindros com dimensões de 5 a 6 mm de diâmetro e 30 a 40 mm de comprimento. A umidade do produto se encontra entre 12 e 18% (b.u.) e a umidade do resíduo a peletizar não deve ser maior que 20% (b.u.). A densidade do pelet a granel está na faixa de 600 a 800 kg/m³ [20].

ii. Enfardamento: A operação de enfardamento consta em prensar o resíduo a baixa pressão, dando-se a forma de um paralelepípedo, geralmente utilizado para o bagaço ou palha de cana. O fardo apresenta uma menor densidade do que o pelet produzido na peletização. Ao contrário do pelet, o fardo não mantém-se rígido espontaneamente, devendo ser amarrado com dois ou mais fios de arame ou fitas plásticas. Os equipamentos para a prensagem são prensas horizontais de produção contínua. Apresenta menor investimento e é utilizado principalmente para baixar os custos de transporte e estocagem (se estocado convenientemente em cerca de poucos dias reduz-se consideravelmente sua umidade) [20].

iii. Briquetagem: A briquetagem é o processo de compactação de maior consumo dentre os processos de redução de volume de finos de carvão e resíduos em geral. Em geral, possuem de 6 a 9 cm de diâmetro ou de lado e 15 a 20 cm de comprimento. Esse processo será descrito a seguir em maiores detalhes.

III.b. Briquetagem de resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal.

i. Definição:

Define-se briquetagem como um processo no qual pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definida e de maior tamanho. Através desse processo, sub-produtos de beneficiamento agroflorestal e finos de carvão convertem-se em um material de maior valor comercial (briquete)[29]. Particularmente neste capítulo é estudada a briquetagem de finos de carvão vegetal e resíduos agroflorestais para fins energéticos. Os parâmetros decisivos para este tipo de briquete são: resistência mecânica, resistência ao impacto, baixa higroscopidez, densidade e boas propriedades de queima.

ii. Histórico:

A aglomeração manual de finos iniciou-se com o carvão mineral desde tempos remotos na China e Inglaterra com a utilização de ligantes de origem mineral, vegetal e até mesmo animal. A fabricação comercial mecanizada de briquetes de carvão mineral teve início na França em 1842. Até a segunda guerra mundial foram produzidas grandes quantidades em diversos países da Europa, sendo utilizados em fornos e caldeiras. Pela primeira vez em 1915 foi realizada a briquetagem do carvão vegetal em uma fábrica do Tennessee, EUA, que produzia metanol através da destilação destrutiva da madeira, onde os finos de carvão vegetal,

sub-produtos do processo, eram briquetados usando-se alcatrão de madeira como ligante, também resíduo do processo de destilação .

Outra usina de briquetagem foi construída muitos anos depois pela Ford Motor Co. em Michigan, EUA, onde a matéria-prima eram aparas de madeira usada para a produção de carrocerias de veículos. As aparas eram carbonizadas, o carvão moído e briquetado utilizando como ligante amido e água [29].

Atualmente ocorre em larga escala a produção de briquetes de finos de carvão mineral, vegetal e resíduos agroflorestais nos EUA e países da Europa e Sudeste Asiático.

iii. Processos:

Descreve-se a seguir dois processos de briquetagem de grande importância para resíduos agroflorestais e finos de carvão vegetal:

- Briquetagem a quente
- Briquetagem através da utilização de ligantes

- Briquetagem a Quente: Utilizada principalmente com resíduos vegetais, consiste na prensagem do material aliada a um aquecimento à temperaturas de pré-pirólise, que na maioria dos resíduos situa-se na faixa de 200 a 270° C . A essas temperaturas, devido à decomposição parcial da lignina presente, ocorre um efeito ligante da própria biomassa (efeito termoplástico), fazendo com que se consiga uma consistência no briquete, somente possível com a adição de ligantes no processo a frio [17]. A vantagem principal está na redução da pressão necessária para adquirir-se uma consistência satisfatória no briquete, proporcionando com isso, uma diminuição dos custos envolvidos no processo. Esses briquetes, industrialmente podem ser produzidos através de extrusoras termoplásticas com sistema de rosca sem fim que realizam o aquecimento da biomassa e simultaneamente exercem

pressão para a compactação através da rotação da rosca. Essas extrusoras têm sido utilizadas em grande escala no sudeste asiático (principalmente Tailândia) nos últimos dez anos, geralmente com casca de arroz e serragem, visando o mercado doméstico. Um esboço dessa extrusora é dado na fig. 2 [17].

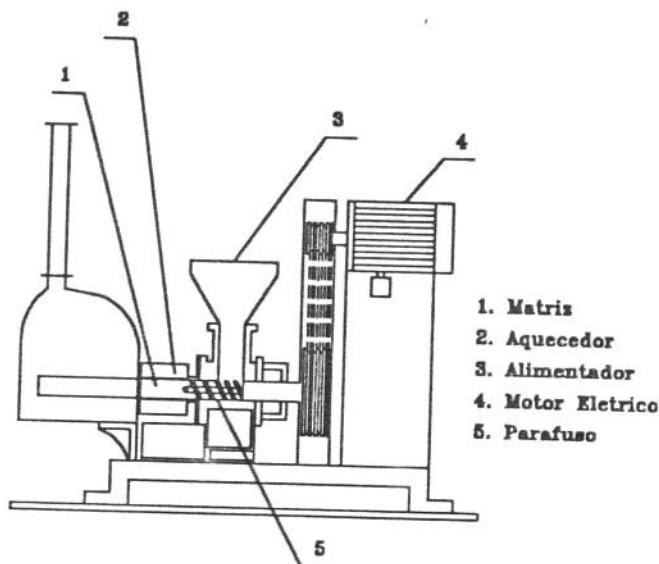


Fig. 5. Esboço de extrusora termoplástica para biomassas.

Com o objetivo da redução no consumo de energia na prensagem, frequentemente é realizado o pré-aquecimento do resíduo, reduzindo a umidade e o esforço na prensagem. Os produtos obtidos são briquetes torrefados (pré-piroalisados) com teores de voláteis e carbono fixo próximos aos do insumo original e com poder calorífico ligeiramente superior.

Os briquetes a quente podem substituir a lenha em suas diversas aplicações. Através de pirólise, pode-se transformá-los num coque vegetal consistente, de formas e dimensões variadas, com a possibilidade de substituir em parte o carvão vegetal e coque metalúrgico importado em siderurgias e em outras aplicações energéticas.

- Briquetagem através da utilização de ligantes: Esse processo pode ser utilizado para a briquetagem de finos de carvão vegetal ou carvão proveniente da carbonização de resíduos agroflorestais gerando finos (p. ex. bagaço, palha de cana, serragem,...)

Uma metodologia típica para a briquetagem de finos de carvão deve passar pelas seguintes etapas: [30]

- Moagem do carvão: A moagem é necessária para evitar partículas muito grandes que prejudiquem a ação dos materiais ligantes. Normalmente são utilizados moinhos de martelo e a faixa granulométrica ideal, geralmente é abaixo de 3 mm, sendo função da natureza do carvão, do tipo de prensa, da forma e do tamanho do briquete.

- Mistura com o ligante: O ligante é um material com propriedades aglutinantes que tem a função de unir as partículas do carvão. A escolha do tipo e quantidade de ligante é o ponto mais crítico na manufatura de briquetes, sendo a etapa mais sensível aos custos do processo.

- Prensagem: A briquetagem propriamente dita resulta da aplicação de pressão através de prensas sobre a massa de carvão e ligante, fazendo com que o briquete adquira resistência e formato geométrico definido. Deve ser realizado o aquecimento simultâneo de acordo com o ligante utilizado.

- Secagem: Alguns ligantes são adicionados com água ao briquete, proporcionando uma umidade alta ao produto final. Por esse motivo deve ser realizado um processo de secagem, que geralmente é conseguido com a passagem de ar quente e seco.

- Estocagem e Embalagem: Os briquetes são armazenados em silos de estocagem dimensionados para manter um estoque intermediário entre a produção e a distribuição. Em seguida são empacotados para consumo.

Tipos de Ligante:

A escolha do ligante a ser utilizado é função do custo e do uso final que se pretende para o briquete. Geralmente são bem mais caros que o próprio carvão, sendo necessário um balanço entre as quantidades dos dois componentes a fim de se conseguir um produto viável para produção e consumo.

Os principais requerimentos dos ligantes são:

- Alta taxa aglomerante
- Inexistência de material inerte em sua composição
- Barato e abundante
- Simplicidade de uso
- Resistência mecânica, resistência à umidade e resistência a quente
- Boas condições de operacionalidade.

Em alguns ligantes podem ocorrer reações químicas com o material compactado que conferem boas características ao briquete, como é o caso do cal e o melaço que reagem com o carvão formando uma camada de proteção à água. Outros ligantes podem ter propriedades lubrificantes e funcionam reduzindo a fricção entre partículas aumentando a compactação, servindo também como um agente intermediário entre o briquete e as ferramentas. Alguns exemplos são o óleo, amido seco, talco, ceras e grafite.

A seguir tem-se alguns exemplos de ligantes mais utilizados [31]:

- Piche: Fração mais pesada resultante da destilação do alcatrão mineral ou vegetal, é uma matéria-prima indispensável com numerosas aplicações na briquetagem. Possui composição complexa com massas moleculares que variam de poucas centenas a milhares de unidades. As principais características do piche são ponto de amolecimento, conteúdo de carbono fixo, capacidade de moagem ou ponto de quebra, conteúdo de enxofre, solubilidade, conteúdo de voláteis, poder calorífico, umidade, carbono conradson e cinzas. Deve-se ressaltar também que o alcatrão

mineral (matéria-prima para a produção de piche) também é usado em plantas de briquetagem.

- Betumen (Asfalto): É uma fração pesada resultante da destilação do petróleo. Tem boas propriedades ligantes, sendo que os briquetes produzidos são à prova de intempéries com a desvantagem de aumentar um pouco a quantidade de cinzas. Tolera maior umidade que o piche. Os principais testes de caracterização são o ponto de amolecimento, penetração e dutilidade. Os principais problemas de utilização são as propriedades cancerígenas e poluição do ar.

- Licor Sulfítico: É um resíduo obtido em grande quantidade quando celulose é produzida da madeira usando processos sulfíticos. Soluções lignosulfonadas são obtidas tratando o licor sulfítico com ácido para precipitar a lignina e substâncias adesivas que são filtradas e misturadas com o licor negro. Este ligante produz briquetes com alta resistência por causa das consideráveis propriedades adesivas. As principais desvantagens são alta concentração de enxofre, baixa resistência à água e não entra em ignição facilmente.

- Amido: O grande poder adesivo dos amidos faz com que sirvam como ligantes para a produção de briquetes de carvão com alta resistência. O amido pode ser adicionado ao carvão como sólido ou mais comumente em suspensão em uma solução aquosa. Com o emprego de amido seco torna-se possível o uso de briquetes com matéria-prima possuindo alta umidade já que aproximadamente 8% de água é usada para a produção da suspensão de amido. A desvantagem desse ligante é o seu alto preço o que limita a sua utilização industrial.

- Cal: O cal possui grande aplicação porque é relativamente barato e abundante. A produção de briquetes com cal envolve a conversão do hidróxido de sódio (Na(OH)_2) e CO_2 a carbonato de cálcio (CaCO_3) endurecendo-se os briquetes. Podem ser usados em aquecimento doméstico e caldeiras industriais.

Equipamentos utilizados:

O equipamento principal em uma unidade de briquetagem é a prensa, com a função de realizar a união do carvão com o ligante através da ação de esforços entre eles, possibilitando que a função aglomerante do ligante ocorra. Com isso o briquete adquire resistência mecânica, formato geométrico definido que na maioria dos casos é acompanhado de um aumento na densidade em relação ao material inicial.

Os principais tipos de prensas utilizadas são as prensas de extrusão e as prensas de rolos descritas abaixo [31]:

- Prensas de Extrusão: As prensas de extrusão possuem uma matriz com molde originalmente feito para dar forma no briquete. Trabalham com princípio de pistão-matriz, onde a força passa ao pistão vindo do virabrequim. O pistão serve como uma ferramenta de pressão com a função de pressionar o briquete no canal molde (matriz). Cada golpe compacta a mistura carvão-ligante e empurra o material pelo canal compactando-o. A maior utilização desse tipo de prensa atualmente é na Alemanha, onde a indústria do briquete vem sendo desenvolvida desde a 2^a Guerra Mundial, devido à escassez de combustível nesse período, onde houve a necessidade de se procurar novas alternativas para o problema energético do país.

- Prensa de Cilindros Giratórios: Provavelmente representa o mais conhecido tipo de prensa, sendo utilizadas em países industrializados para briquetes com ligante e uma grande variedade de materiais. As prensas compreendem dois cilindros de diâmetro igual girando em direções opostas à mesma velocidade. O movimento é geralmente efetivado por volantes de engrenagem com absoluto sincronismo. As superfícies dos cilindros possuem vários copos com o formato dos briquetes e o material é carregado por uma panela de distribuição e um alimentador ou uma rosca de alimentação. A quantidade de material deve ser dimensionada de forma que com

a rotação dos cilindros haja uma pressão que produzirá os briquetes. As formas dos briquetes nesse processo podem ser bastante variadas e dependem do tipo de cavidade nos cilindros giratórios. A mais indicada é a de uma pequena almofada quadrada com os cantos arredondados ou ovalada que evitam quebras em cantos vivos, geram baixo índice de vazios na estocagem e permitem a fácil manutenção dos cilindros. O maior produtor de briquetes que utilizam este equipamento é os EUA, principalmente nos estados da Carolina do Norte e Carolina do Sul, e visam basicamente o mercado comercial e doméstico [29].

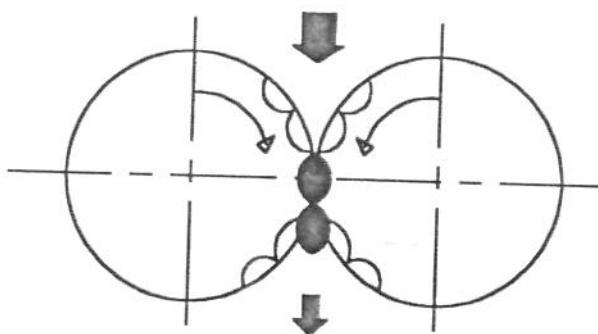


Fig. 6. Esquema da prensa de cilindros giratórios com iguais diâmetros.

Para uma indústria de briquetagem, além da prensa tem-se uma série de outros equipamentos importantes como secadores da matéria-prima, secadores para o briquete, misturadores, correias transportadoras, sistemas de suprimento do carvão e carregamento do produto final, sistemas de moagem e pátio de armazenamento da matéria-prima e dos briquetes produzidos.

A produção e consumo de briquetes de finos de carvão já estão consolidados nos EUA e alguns países da Europa que já possuem um mercado específico para esses combustíveis, bem como para alguns países do sudeste asiático que produzem briquetes de resíduos agroflorestais em escala industrial [17]. Para o Brasil a situação é favorável devido às grandes quantidades desses resíduos que são desperdiçadas anualmente e que processadas através da compactação poderiam competir no mercado com outros combustíveis semelhantes. Já é realizada a compactação de serragem proveniente de indústria madereira em escala industrial visando o mercado doméstico e comercial (padarias, pizzarias, restaurantes,...) e geração de vapor em algumas indústrias (têxteis e alimentos), principalmente nos estados do sul do país. As principais vantagens do briquete estão no fornecimento regular, formato geométrico definido, facilidade de armazenamento e propriedades uniformes (umidade e poder calorífico).

IV. Descrição experimental.	43
<i>IV.a. Descrição dos ensaios laboratoriais de briquetagem de resíduos agroflorestais.</i>	43
<i>IV.b. Equipamentos utilizados para os ensaios laboratoriais.</i>	44
<i>IV.c. Métodos de caracterização dos insumos utilizados e produtos obtidos.</i>	51
<i>IV.d. Descrição e análise dos ensaios realizados.</i>	55
<i>i. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima o bagaço de cana.</i>	55
<i>ii. Preparação de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima o bagaço de cana pré-processado.</i>	64
<i>iii. Preparação de briquetes de bagaço de cana utilizando temperaturas do início da pirólise.</i>	66
<i>iv. Pirólise do bagaço "in natura" e posterior briquetagem a quente com a adição de ligante (piche vegetal).</i>	68
<i>v. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima a palha de cana.</i>	75
<i>vi. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima serragem derivada de indústria madereira.</i>	79
<i>vii. Análise dos resultados do PCS e densidade.</i>	82

IV. Descrição Experimental.

IV.a. Descrição dos Ensaios Laboratoriais de Briquetagem de Resíduos Agroflorestais.

Neste capítulo será descrito um desenvolvimento experimental a nível de bancada com o objetivo da obtenção de parâmetros de processo passíveis de utilização em uma planta industrial de briquetagem de resíduos agroflorestais.

A idéia principal é o tratamento dos resíduos a altas temperaturas e pressões através da utilização do efeito termoplástico que ocorre em biomassas à temperatura de pré-pirólise pela decomposição da lignina presente proporcionando um efeito aglutinante na prensagem o que dá ao briquete alta resistência mecânica. Se o objetivo for a produção de carvão, é indicada a realização de pirólise controlada posteriormente à compactação, visando a produção de briquetes carbonizados.

Os resíduos utilizados para os ensaios são o bagaço, palha de cana e serragem derivada da indústria madeireira.

A sistemática experimental prevê variar pressões e temperaturas de briquetagem estudando-se a conveniência da utilização de ligantes. Para o tratamento de pirólise variam-se as taxas de aquecimento e temperatura final. Através da análise das propriedades dos briquetes produzidos e de sua caracterização, consegue-se obter os melhores parâmetros de produção passíveis de serem aplicados em uma instalação industrial.

IV.b. Equipamentos utilizados para os ensaios laboratoriais.

Os equipamentos principais projetados e construídos para a realização dos tratamentos térmicos e de compactação visando a produção de briquetes a nível de bancada são:

- *Sistema de Briquetagem a Quente:* (fig. 7) [32]

Equipamento necessário para a produção de briquetes a altas temperaturas e pressões, com a finalidade de se obter um produto de resistência mecânica elevada.

É constituído de:

- Célula de pressão de aço em formato cilíndrico com diâmetro externo de 3" (7,6 cm), interno de 1" (2,6 cm) e comprimento de 20 cm. Composta de capa externa e interna, base e pistão.
- Forno para aquecimento da célula: Composto de tubo de alumina, resistência elétrica, material isolante e capa externa de aço.
- Prensa de bancada com capacidade de 15 t com manômetro para o controle de pressão. O forno é acoplado à estrutura da prensa de forma a permitir o aquecimento e prensagem simultâneos à célula de pressão. A menor divisão da escala do manômetro utilizado é de 0,1 t, o que equivale a uma pressão de 2 MPa para o diâmetro do pistão utilizado ($1" = 2,6 \text{ cm}$).
- Controlador de temperatura final (ENGRO - Série 6.000) acoplado a chave magnética: Com um termopar (tipo K) inserido na célula de pressão é possível controlar a temperatura final do forno e da própria célula, mantendo-a constante pelo período desejado. O controlador apresenta a menor divisão da escala de 10°C .

O equipamento foi montado, ajustando-se suas dimensões para a produção de briquetes de 1" (2,5 cm) de diâmetro e comprimento médio de 6 cm.

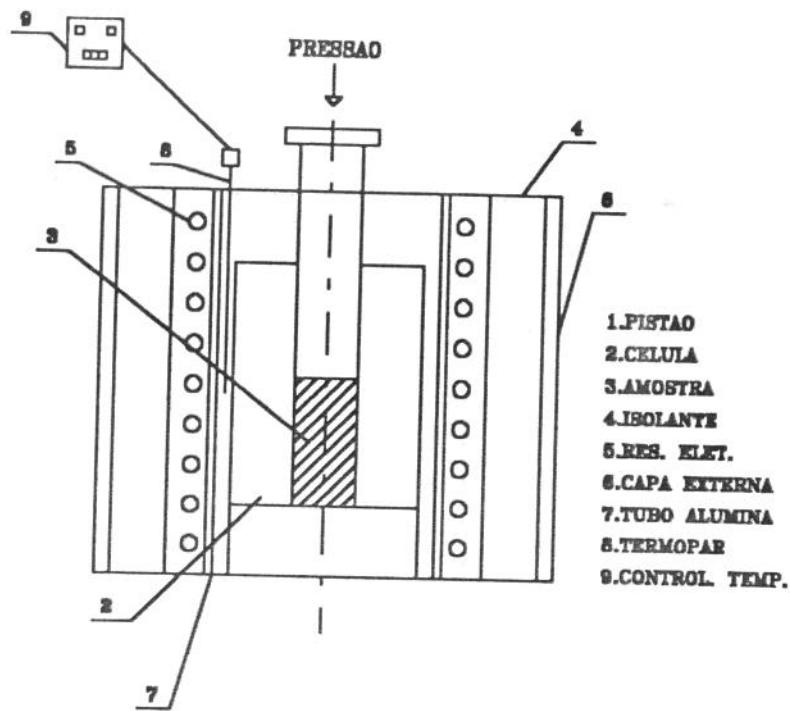


Fig. 7. Esboço do sistema de briquetagem a quente.

Para aferição da temperatura em relação ao tempo de aquecimento do forno foram realizados ensaios com um termopar de controle no interior da célula (local onde se encontra a amostra) com temperaturas finais no controlador de:

- 150°C (fig. 8a) - 250°C (fig. 8c)
- 200°C (fig. 8b) - 300°C (fig. 8d)

Os resultados da aferição são gráficos de temperatura (°C) x tempo (min), com as temperaturas finais dadas pelos valores acima.

A aferição possui a finalidade de se tornar confiável a repetibilidade dos ensaios a serem realizados com amostras de diversos materiais.

obs.: Foram coletados dados com um intervalo de 5 min, tendo como primeiro ponto a temperatura ambiente.

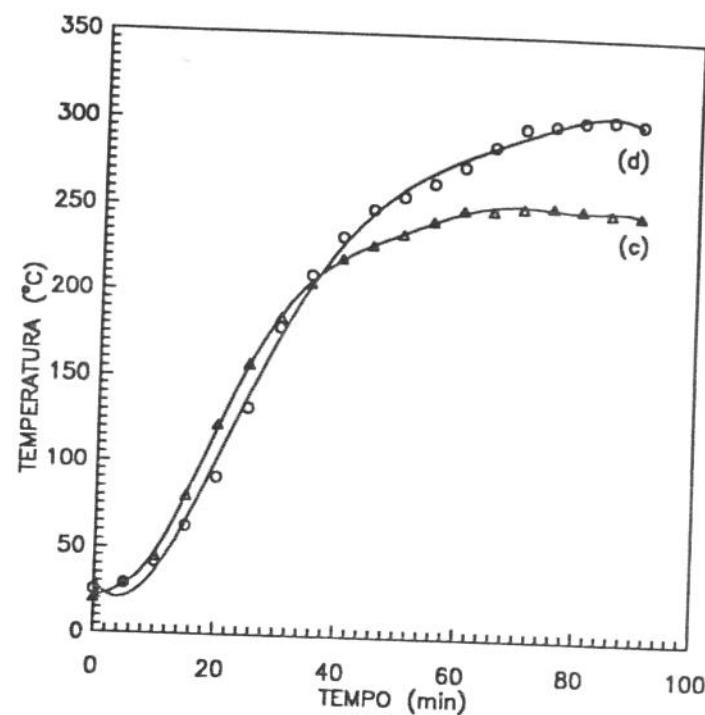
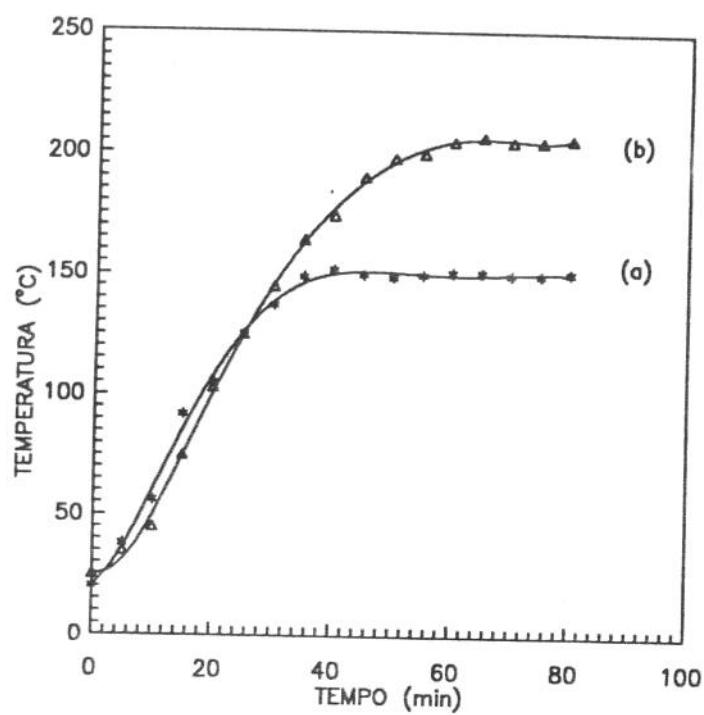


Fig. 8 - Gráficos Temperatura x Tempo no interior da célula de pressão (local onde se encontra a amostra em teste), para a aferição do sistema de briquetagem a quente.

Temperatura final: - 150°C (a)

- 250°C (c)

- 200°C (b)

- 300°C (d)

- Sistema de Pirólise com Taxas de Aquecimento Controladas e Atmosfera Inerte (Nitrogênio): (fig. 9)

Equipamento necessário para a pirólise dos briquetes produzidos pelo sistema de briquetagem a quente. O objetivo principal é o de produzir carvão com características semelhantes ao carvão atualmente comercializado.

Esse equipamento realiza a pirólise do material com possibilidade de ajuste dos parâmetros essenciais ao processo:

- Taxas de aquecimento
- Temperatura final
- Tempo de residência à temperatura final

É constituído de:

- Caixa de carbonização blindada: Caixa de aço vedada com amianto, onde é colocada a amostra a ser pirolisada.

Dimensões: 25x10x10 (cm)

- Forno (Quimis - Mod. Q.318-24):

Dimensões internas: 30x15x15 (cm)

Temperatura máxima: 1.200°C

Menor divisão na escala: 10°C

- Tubo de nitrogênio: Acoplado à caixa de carbonização a fim de proporcionar atmosfera inerte à amostra durante o tratamento térmico.

- Condensador de alumínio à água corrente: Acoplado à caixa de carbonização, com a função de durante a pirólise condensar os voláteis decorrentes do processo.

- Variac 220 V (Varivolt): Utilizado para controlar taxas de temperatura e temperatura final através da variação da voltagem e consequentemente da potência entregue ao forno. A menor divisão na escala é de 5 V.

- Milivoltímetro para leitura da temperatura através de termopar (tipo K) colocado no interior da caixa de carbonização.

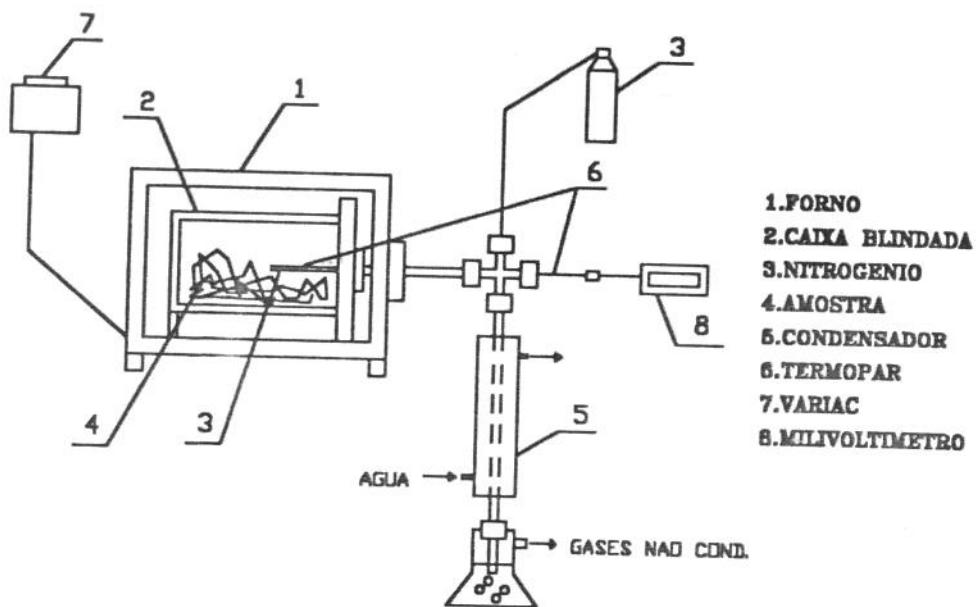


Fig. 9. Esboço do sistema de pirólise com taxas de aquecimento controladas e atmosfera inerte (nitrogênio).

Após a construção de suas partes individuais, o equipamento foi montado e ajustado para as condições de uso. Objetivando a sua aferição foram realizados os seguintes ensaios descritos na tab. 7:

Ensaio	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura Final (°C)	Figura
1	2	350	6a
2	3	350	6b
3	2	400	6c
4	3	400	6d

Tab. 7. Parâmetros dos ensaios para aferição do sistema de pirólise com taxas de aquecimento controladas e atmosfera inerte.

obs.: Os gráficos constituem-se de pontos de Temperatura x Tempo no interior da caixa de carbonização medidos com intervalos de 10 min (fig. 10)

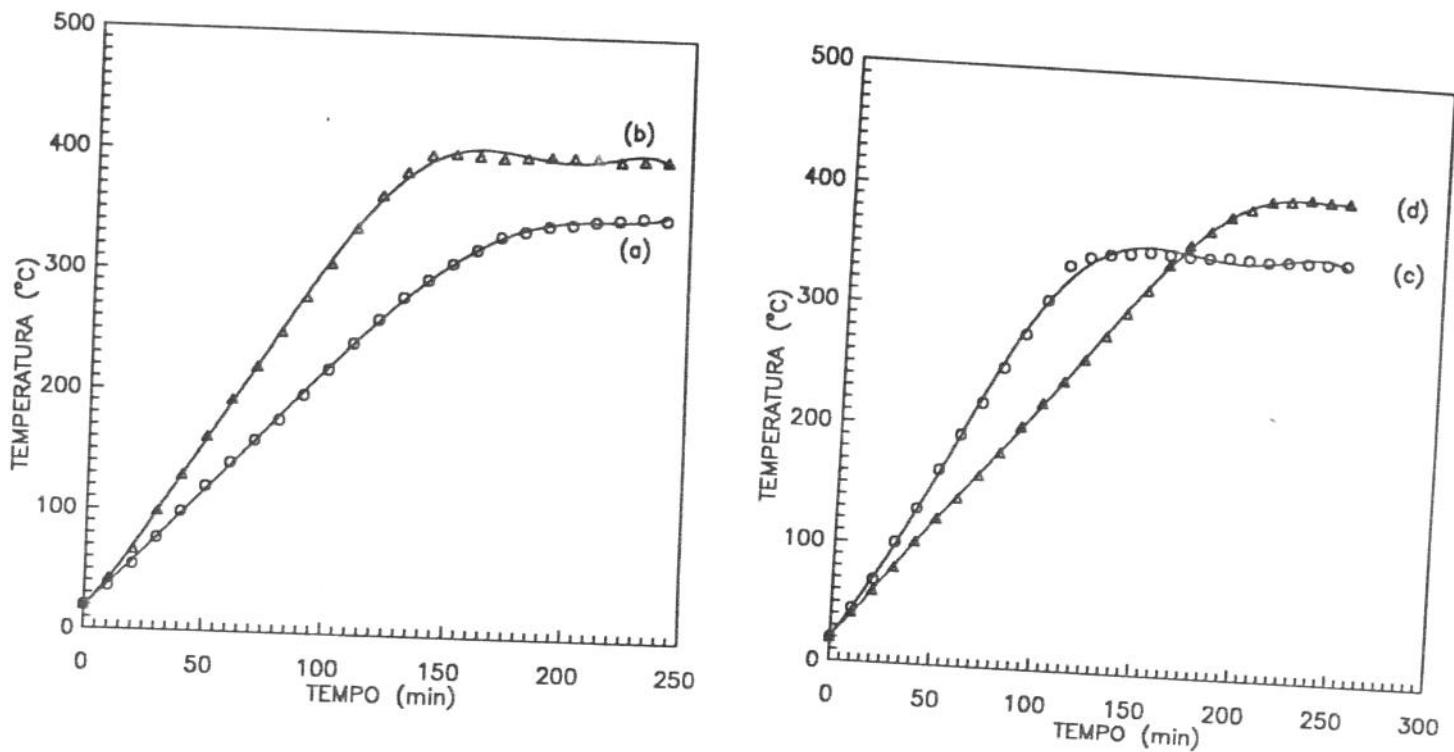


Fig. 10. Gráficos Temperatura x Tempo da caixa de carbonização sem amostra para aferição do sistema de pirólise.

(a) Taxa de aquecimento: 2°C/min

Temperatura final: 350°C

(b) Taxa de aquecimento: 3°C/min

Temperatura final: 400°C

(c) Taxa de aquecimento: 3°C/min

Temperatura final: 350°C

(d) Taxa de aquecimento: 2°C/min

Temperatura final: 400°C

Com os dados de aferição dos equipamentos torna-se confiável a repetição dos ensaios com as amostras desejadas.

IV.c.Métodos de caracterização dos insumos utilizados e produtos obtidos.

As principais propriedades para a caracterização dos resíduos agroflorestais utilizados como insumos e dos briquetes produzidos para finalidades energéticas são citadas a seguir:

Granulometria: Utilizável somente na caracterização dos insumos. Fornece uma estimativa média das dimensões das partículas de materiais granulados. A unidade utilizada é o mesh (número de orifícios por polegada quadrada).

Densidade: É utilizada neste trabalho a densidade geométrica, que fornece o valor da massa por unidade de volume externo total incluindo-se todos os espaços interiores não ocupados pelo material. A unidade usada é o kg/m³.

Umidade: Fornece o valor da umidade evaporável a 100°C. Pode ser calculada em base seca - b.s. - (porcentagem da massa de H₂O em relação à massa seca da amostra) ou base úmida - b.u. - (porcentagem da perda de massa em relação à massa total inicial). Os valores de umidade neste trabalho serão fornecidos em base úmida.

Análise Imediata: A análise imediata fornece os valores percentuais em relação à massa total de voláteis, carbono fixo e cinzas calculados em base seca. A relação entre esses componentes na biomassa ou carvão fornece estimativas da qualidade do material como combustível. A determinação da quantidade de voláteis e cinzas são determinados em mufla com a amostra aquecida respectivamente a 900 e 750°C; a determinação da quantidade de carbono fixo é feita pela diferença percentual sobre a massa total. A norma utilizada neste trabalho é a ASTM D 1762 [33] e todos os ensaios são realizados em triplicata.

A quantidade de cinzas existente nos resíduos agroflorestais é um dado importante a ser considerado quando esses materiais forem utilizados como combustível em caldeiras. Em temperaturas elevadas essas cinzas (geralmente

silicatos) podem fundir e provocar incrustações danosas ao equipamento. Deve-se levar em consideração nesses casos a quantidade e a temperatura de fusão das cinzas do material utilizado. Temperaturas de fusão de alguns resíduos agroflorestais são citadas na tab. 8. Ressalta-se que na maioria das biomassas a temperatura de fusão das cinzas varia entre 600 e 1.400°C [14].

Resíduo	Temp. Deformação das Cinzas (° C)	Temp. Fusão das Cinzas (°C)
Bagaço de Cana	1.300 - 1.350	1.420 - 1.450
Casca de Arroz	1.290 - 1.340	1.430 - 1.500
Caule de Algodão	1.320 - 1.380	1.400 - 1.450
Caule de Bambú	1.300 - 1.390	1.400 - 1.450
Espiga de Milho	800 - 900	950 - 1.050

Tab. 8. Temperatura de deformação e fusão das cinzas de alguns resíduos agroflorestais [14].

Poder Calorífico Superior (PCS): O poder calorífico é uma das principais características de um material quando utilizado como combustível. Fisicamente é a grandeza que fornece a energia térmica produzida em um processo de combustão por unidade de massa do combustível, sendo igual à entalpia padrão de combustão com sinal contrário:

$$PC = -\Delta H_{\text{combustão}}$$

O equipamento utilizado para a determinação do poder calorífico das amostras neste trabalho foi o calorímetro isoperibólico (ao contrário do adiabático o calorímetro isoperibólico permite troca de calor com o meio, desde que sejam

realizadas devidas correções através da determinação da constante do calorímetro - C) que fornece o valor do poder calorífico superior (PCS), onde a água proveniente da combustão do hidrogênio é condensada ao estado líquido [34].

A técnica para determinação do PCS, pelo calorímetro isoperibólico, consiste em promover a combustão da amostra a ser testada pela queima de um filamento através da passagem de uma corrente elétrica em uma câmara de aço inox com isolamento térmico em atmosfera de oxigênio saturada com H₂O. O calor gerado aumenta a temperatura de uma quantidade conhecida de água, contida em um balde metálico, mantida homegênea por um agitador. Esse aumento de temperatura é registrado usando um termistor na água do balde. A fig. 11 mostra um esboço do equipamento[34].

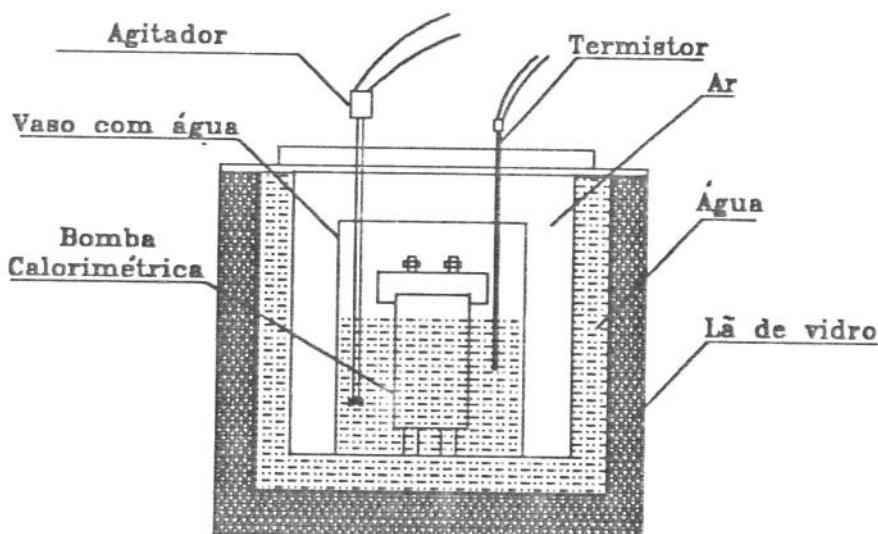


Fig. 11. Esboço do calorímetro isoperibólico utilizado nos ensaios para determinação do PCS [34].

Os primeiros ensaios possuem a função de calibrar o calorímetro determinando-se uma constante (C) que servirá como um fator corretivo para o cálculo do PCS das amostras desejadas. Para isso ensaiá-se uma amostra padrão com PCS definido (ácido benzóico: PCS= 26.400 kJ/kg).

Tem-se que o calor produzido pela combustão é dado por:

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde ΔT é a variação de temperatura medida pelo termistor no balde de água do calorímetro.

Por outro lado:

$$Q = PCS \cdot m \quad (2) \quad \text{onde } m \text{ é a massa da amostra}$$

Portanto de (1) e (2) temos:

$$PCS = \frac{\Delta T \cdot C}{m} \quad (3)$$

Para o cálculo de C tem-se para o ácido benzóico

$$C = \frac{PCS_{(ac\ benzóico)}, m}{\Delta T} \quad (4)$$

Através de diversos ensaios chegou-se ao valor da constante C :

$$C = 500 \pm 10$$

Para cada ensaio consegue-se experimentalmente os valores de ΔT e m . Utilizando-se (3) calcula-se o PCS desejado. A metodologia usada segue a norma ASTM D 3286 [35], para a determinação do PCS, levando-se em conta os detalhes do tipo de aparelho e amostras utilizadas, sendo todos os ensaios feitos em triplicata.

O desvio das medidas experimentais realizadas é dado pelo desvio padrão dos valores obtidos (ensaios realizados em triplicata).

IV.d. Descrição e análise dos ensaios realizados.

i. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima o bagaço de cana:

Análise dos insumos: O bagaço utilizado nos ensaios é o resultante da extração do caldo de cana pelo processo convencional das usinas sucroalcooleiras, sem nenhum tratamento adicional ao normalmente realizado.

- Granulometria: A granulometria desse bagaço é bastante heterogênea, variando de lascas de até 8 cm a partículas da ordem de 0,1 mm. Essa heterogeneidade do material é benéfica para a briquetagem, pois as partículas pequenas preenchem espaços entre as maiores proporcionando um melhor empacotamento do material como um todo. Esse arranjo desordenado favorece o aumento de resistência do briquete pois dificulta a formação de planos de escorregamento. Por esse motivo neste ítem será utilizado o bagaço "in natura" para a realização dos ensaios em laboratório.

- Umidade: Durante os ensaios de briquetagem a quente observou-se um processo de redução da umidade do bagaço devido ao tratamento a temperaturas superiores a 100°C. Portanto nos ensaios laboratoriais não realizou-se a secagem prévia do insumo, condição que ocorre durante o processo. A umidade do bagaço utilizado nos ensaios foi calculada em $47 \pm 1\%$ b.u.

- Análise imediata (b.s.): Voláteis: $79,0 \pm 0,6\%$

Carbono Fixo: $17,5 \pm 0,4\%$

Cinzas: $3,5 \pm 0,2\%$

- Poder calorífico superior (PCS):

$$PCS_{(0\% \text{ um.})} = 17.300 \pm 200 \text{ kJ/kg}$$

$$PCS_{(47\% \text{ um.})} = 10.000 \pm 200 \text{ kJ/kg}$$

- Densidade geométrica: $120 \pm 10 \text{ kg /m}^3$

- *Descrição dos ensaios realizados:*

Os ensaios foram feitos tomando-se como principais os seguintes parâmetros:

- 1.Temperatura final
- 2.Pressão de briquetagem
- 3.Tempo de residência à temperatura final

1.Temperatura final: Para determinar a região de pré-pirólise do bagaço de cana, ou seja, a faixa de temperatura onde a ação termoplástica ligante do material se torna evidente é necessária a análise do diagrama termogravimétrico do bagaço realizado com taxas de aquecimentos de 4°C/min (fig.7)[14]. O gráfico assinalado pelos pontos marcados por "Δ" descreve a porcentagem (em relação à massa inicial) da perda de massa devido à evolução dos voláteis em função do aumento da temperatura de tratamento térmico. O gráfico assinalado pelos pontos marcados por "o" descreve a velocidade que ocorre a perda de massa em função do aumento da temperatura de tratamento térmico (a unidade dessa velocidade é % perda de massa/°C e a ordenada do gráfico é orientada para baixo). Observando-se o diagrama percebe-se que a maior perda de voláteis (início da pirólise) começa a temperaturas entre 280 e 300°C, faixa essa em que deve-se direcionar os ensaios de briquetagem a quente, visando um efeito ligante ao briquete. Observa-se também que a maior taxa de evolução de voláteis é por volta de 380°C.

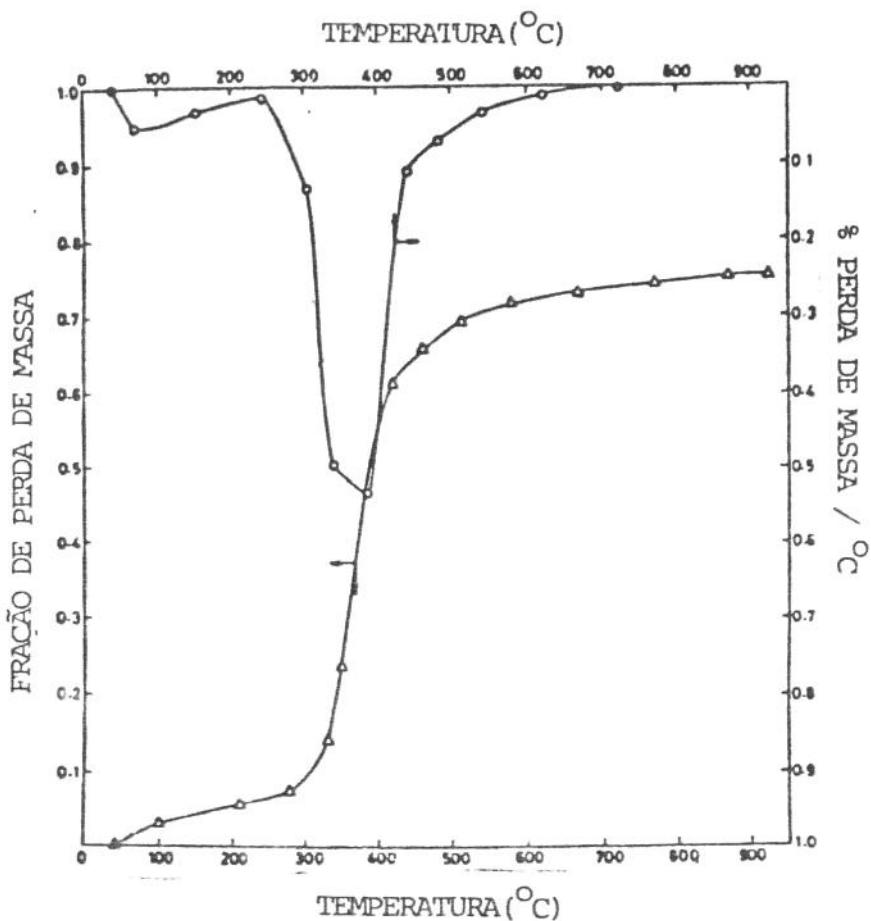


Fig.12. Diagrama termogravimétrico do bagaço de cana realizado a taxa de aquecimento de 4°C/min[14].

As temperaturas utilizadas nos ensaios foram 150, 200, 250 e 300°C. Temperaturas intermediárias entre estas não produziram mudanças sensíveis no briquete final, motivo pelo qual foi adotado o intervalo de 50°C entre cada ensaio.

2. Pressão de briquetagem: As pressões de briquetagem são medidas pelo manômetro da prensa, levando em consideração a área transversal do pistão da célula. As pressões utilizadas foram 10, 15 e 20 MPa.

3. Tempo de residência à temperatura final: O tempo de tratamento térmico é calculado de acordo com os gráficos de aferição da célula de pressão (fig. 8). Para cada temperatura de briquetagem o tempo total é dado pelo tempo necessário para alcançar a temperatura final mais 15 minutos de estabilização. Portanto do gráfico tem-se para cada valor:

$$150^{\circ}\text{C}: 45 + 15 = 60 \text{ min}$$

$$200^{\circ}\text{C}: 55 + 15 = 70 \text{ min}$$

$$250^{\circ}\text{C}: 65 + 15 = 80 \text{ min}$$

$$300^{\circ}\text{C}: 75 + 15 = 90 \text{ min}$$

Em uma instalação industrial existe a viabilidade em se aquecer previamente o material e posteriormente submetê-lo à prensagem, podendo-se dessa forma aproveitar calor residual de caldeiras ou trocadores de calor que porventura possam existir próximos à instalação.

- *Resultados obtidos:* A tab. 9 descreve os ensaios de briquetagem realizados neste ítem. Os parâmetros citados na tabela são: temperatura e pressão de briquetagem, duração do ensaio, quantidade de ensaios realizados com os mesmos parâmetros, umidade média e densidade média do briquete.

Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Tempo Aquec. (min)	Qte. Ensaios	Umid. Média (% b.u.)	Dens. Média (kg/m³)
150	10	60	1	23,0 ± 0,4	660 ± 20
200	10	70	2	6,5 ± 0,2	670 ± 20
250	10	80	2	1,4 ± 0,1	690 ± 20
300	10	90	1	-	-
150	15	60	2	21,3 ± 0,4	870 ± 20
200	15	70	3	6,1 ± 0,2	880 ± 20
250	15	80	3	1,3 ± 0,1	880 ± 20
300	15	90	2	-	-
150	20	60	2	20,2 ± 0,4	1.030 ± 20
200	20	70	10	5,0 ± 0,2	1.030 ± 20
250	20	80	10	1,0 ± 0,1	1.040 ± 20
300	20	90	2	-	-

Tab. 9. Parâmetros dos ensaios de briquetagem do bagaço de cana e umidade (b.u.) e densidade geométrica dos briquetes produzidos.

Os briquetes a temperaturas de 150°C apresentaram umidade relativamente alta e baixa resistência, esfarelando-se facilmente. O motivo para isso é que a temperatura de 150°C é muito baixa para ativar o efeito termoplástico ligante do bagaço.

Por outro lado, os briquetes realizados a 300°C entram na fase de pirólise com evolução excessiva de voláteis. Se não forem realizadas despressurizações temporárias os voláteis entram em combustão, fazendo com que o briquete se esfarele através de sua queima. Neste ítem não foram realizadas tais

despressurizações, de modo que os briquetes produzidos não alcançaram resistência mecânica satisfatória.

Desse modo, os briquetes a temperaturas de 150 e 300°C não proporcionaram bons resultados, independentemente da pressão de briquetagem, sendo portanto, os ensaios com essas temperaturas descartados no prosseguimento do trabalho. Os resultados de maior resistência mecânica foram conseguidos com as temperaturas de 200 e 250°C.

Em relação às pressões utilizadas, 10 e 15 MPa proporcionaram resistência menor ao material, sendo que com a pressão de 20 MPa obteve-se melhores resultados.

Conclui-se, portanto, que os briquetes de maior resistência mecânica foram conseguidos com as temperaturas de 200 e 250°C à pressão de 20 MPa.

- PCS, % aumento do PCS em relação ao bagaço original e análise imediata do briquetes:

Os briquetes caracterizados foram:

1. Temp.: 200°C - Pressão: 20 MPa
2. Temp.: 250°C - Pressão: 20 MPa

Briquete	1	2	Bagaço
Voláteis (% b.s.)	$71,6 \pm 0,6$	$70,2 \pm 0,6$	$79,0 \pm 0,6$
Carbono Fixo (% b.s.)	$24,3 \pm 0,4$	$25,5 \pm 0,4$	$17,5 \pm 0,4$
Cinzas (% b.s.)	$4,1 \pm 0,2$	$4,3 \pm 0,2$	$3,5 \pm 0,2$
PCS (kJ/kg)	17.500 ± 200	19.400 ± 200	17.300 ± 200
% Aumento do PCS	1,2	11,6	-

Tab. 10. Análise imediata (b.s.), PCS e % aumento do PCS dos briquetes em relação ao bagaço de cana original.

Verifica-se pelos dados da tabela que quanto maior a temperatura de briquetagem aumenta-se o teor de carbono fixo e consequentemente o PCS dos briquetes. Ressalta-se que houve um aumento médio da densidade geométrica da ordem de 8 vezes em relação ao bagaço original.

- Tratamento térmico de pirólise com atmosfera inerte e caracterização dos briquetes obtidos:

Foram executados ensaios de pirólise dos briquetes produzidos a 200°C a pressões de 20 MPa, com atmosfera de nitrogênio e recuperação dos voláteis no condensador à água.

Os ensaios utilizaram os parâmetros descritos na tab. 11:

Ensaio	Taxa de aquec. (°C/min)	Temp. Final (°C)	Tempo a Temp. Final (min)	Fig.
1	2	400	40	8a
2	3	350	40	8b
3	2	350	40	8c

Tab. 11. Parâmetros utilizados para a pirólise dos briquetes de bagaço de cana.

A fig. 13 descreve os gráficos Temperatura x Tempo dos ensaios de pirólise realizados:

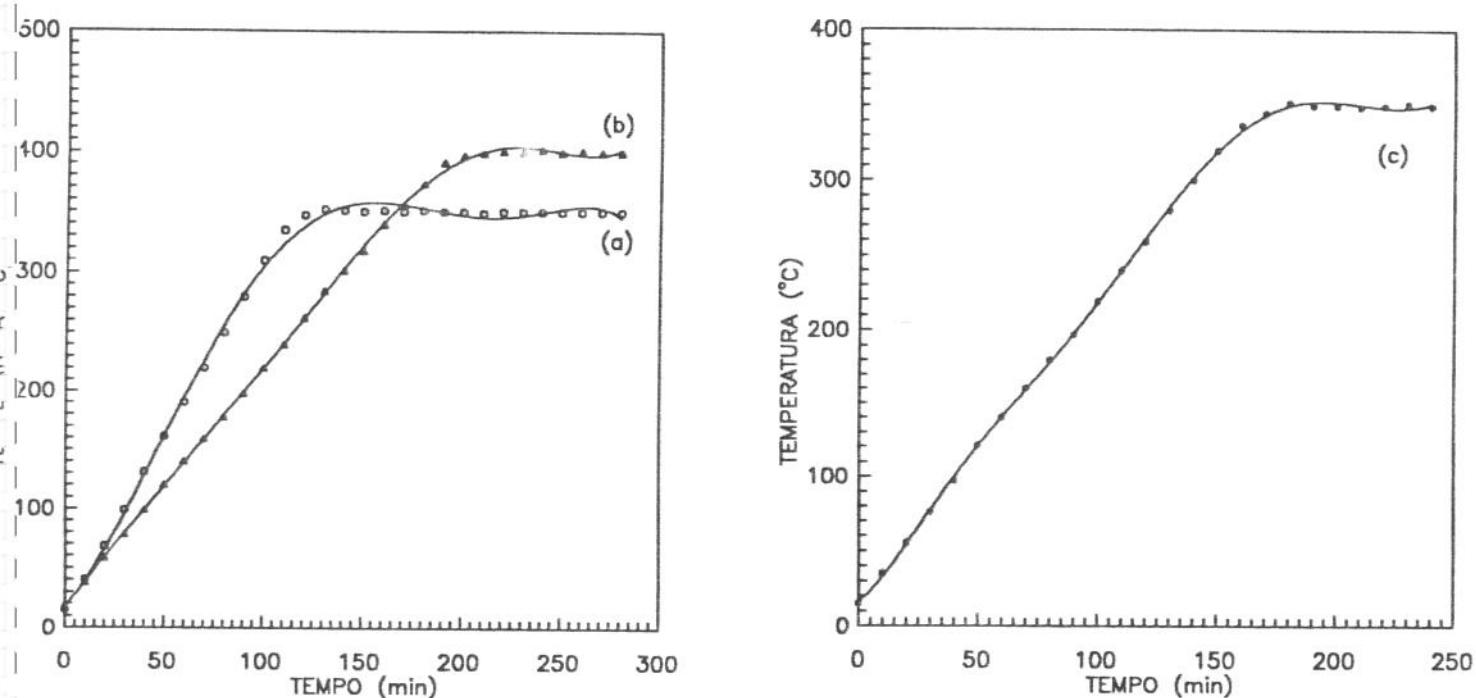


Fig. 13. Gráfico Temperatura x Tempo da amostra coletados no interior da caixa de carbonização (local onde se encontra a amostra).

(a) Ensaio 1: Taxa de aquec.: 2°C/min (c) Ensaio 3: Taxa de aquec.: 2°C/min

Temper. final: 400°C

Temper. final: 350°C

(b) Ensaio 2: Taxa de aquec.: 3°C/min

Temper. final: 350°C

- Balanço de massa (tab. 12): (Porcentagem em relação à massa inicial do briquete)

Ensaio	Carvão (%)	Voláteis (%) *
1	39	61
2	45	55
3	50	50

Tab. 12 Balanço de massa da pirólise dos briquetes de bagaço de cana.

*Os voláteis representam a somatória dos gases condensáveis no condensador à água e dos gases incondensáveis que evoluem para a atmosfera.

- PCS, aumento do PCS em relação ao bagaço original, análise imediata (b.s.) e densidade média dos briquetes de carvão obtido (tab. 13):

Ensaio	1	2	3
Voláteis (% b.s.)	$29,7 \pm 0,4$	$38,7 \pm 0,4$	$41,9 \pm 0,4$
Carbono Fixo (% b.s.)	$49,4 \pm 0,5$	$48,3 \pm 0,5$	$47,1 \pm 0,5$
Cinzas (% b.s.)	$20,7 \pm 0,3$	$13,0 \pm 0,3$	$11,0 \pm 0,3$
Dens. Média (kg/m^3)	500 ± 20	540 ± 20	550 ± 20
PCS (kJ/kg)	26.500 ± 200	25.000 ± 200	25.500 ± 200
% Aumento do PCS	53,2	44,5	47,4

Tab. 13. Análise imediata, densidade média (b.s.), PCS e % aumento do PCS em relação ao bagaço original dos briquetes pirolisados de bagaço de cana.

Foi detectada maior resistência mecânica no ensaio 3 seguido pelos ensaios 3 e 1.

Verifica-se que quanto maiores a temperatura de pirólise e a taxa de aquecimento, menor a densidade e portanto a resistência mecânica do briquete. Esse fato é devido ao maior desprendimento de voláteis quando se aumenta a temperatura de pirólise. Taxas de aquecimento altas resultam em uma rápida evolução dos voláteis o que prejudica a estrutura do material diminuindo-se sua resistência. Por outro lado o poder calorífico aumenta com a temperatura de pirólise, o que faz com que seja necessário um compromisso entre a densidade e poder calorífico para cada caso de utilização do briquete a fim de selecionar a temperatura de pirólise mais adequada.

ii. Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima o bagaço de cana pré-processado:

O objetivo desta etapa é verificar o comportamento dos parâmetros do processo de briquetagem a quente quando mudam-se algumas propriedades da matéria-prima utilizada (no caso o bagaço de cana) como granulometria, densidade e umidade. É importante salientar que a granulometria do bagaço pode variar em função das condições do processo, podendo mudar de características de usina para usina.

Para isso foram utilizadas amostras preparadas com características diversas do bagaço utilizado no ítem i deste capítulo, sendo realizados ensaios de briquetagem semelhantes descritos anteriormente.

O bagaço recebeu tratamento de moagem e secagem, resultando nas propriedades descritas a seguir:

- Granulometria: 15 mesh
- Densidade geométrica: $150 \pm 20 \text{ kg/m}^3$
- Poder Calorífico Superior: $17.400 \pm 200 \text{ kJ/kg}$
- Poder Calorífico Inferior: $15.300 \pm 200 \text{ kJ/kg}$
- Umidade (b.s.): $11 \pm 1 \%$
- Análise Imediata (b.s.):

Voláteis: $81,6 \pm 0,5\%$

Carbono Fixo: $16,6 \pm 0,2\%$

Cinzas: $1,8 \pm 0,1\%$

Resultados: Observou-se através dos ensaios que foi necessário aumentar-se a pressão de trabalho para que o briquete obtivesse resistência semelhante aos produzidos no ítem i. O fator determinante para esse fato é a granulometria, onde observa-se que um bagaço com partículas menores (caso do bagaço estudado neste ítem) deve ser compactado a pressões mais elevadas para se conseguir resistência satisfatória. Os ensaios foram realizados no sistema de briquetagem a quente utilizando temperaturas de 200 e 250°C e pressões de 20 e 25 MPa. Os melhores resultados foram obtidos a temperaturas de 200 e 250°C com pressões de 25 MPa. Os ensaios com pressões de 20 MPa foram descartados devido à resistência inferior obtida. A tab. 14 mostra os resultados dos melhores ensaios:

Temperatura (°C)	200	250
Pressão (MPa)	25	25
Número de ensaios	4	4
Tempo residência (min)	70	80
Voláteis (% b.s.)	$81,0 \pm 0,6$	$76,0 \pm 0,6$
Carbono Fixo (% b.s.)	$16,0 \pm 0,4$	$21,5 \pm 0,4$
Cinzas (% b.s.)	$2,0 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,2$
Dens. média (kg/m³)	1.190 ± 30	1.010 ± 30
PCS (kJ/kg)	17.900 ± 200	19.400 ± 200
% Aumento do PCS	2,9	11,5

Tab. 14. Parâmetros utilizados e resultados obtidos nos ensaios de briquetagem do bagaço de cana pré-tratado.

Observa-se neste caso que houve um aumento de densidade do briquete em relação ao insumo original de aproximadamente 8 vezes, dado que pode ser considerado importante em uma análise de custos do processo. A análise imediata e o PCS dos briquetes mostram resultados relativamente próximos ao do bagaço original, devido ao fato de que as temperaturas de briquetagem ainda estão na faixa de pré-pirólise, onde a devolatilização ainda é pequena.

iii. Preparação e tratamento de briquetes de bagaço de cana utilizando temperaturas do início da pirólise:

O objetivo desta etapa é obter um briquete previamente pirolisado utilizando somente o sistema de briquetagem a quente. Através de prensagem a temperaturas do início da pirólise do bagaço (300 a 350°C) pode-se obter um produto com teores de voláteis menores e carbono fixo maiores em relação aos briquetes produzidos à

temperaturas de pré-pirólise (200 e 250°C) e dependendo-se da finalidade a qual se destina, o briquete pode ser utilizado como um carvão, dispensando-se a etapa de pirólise do briquete verde.

Os ensaios foram realizados com o bagaço caracterizado no ítem ii e testados com os parâmetros de temperatura de 300 e 350°C e pressões de 25 MPa.

Deve-se ressaltar que alguns ensaios foram perdidos pois devido ao grande desprendimento de voláteis a estas temperaturas onde ocorreram pequenas explosões no interior da célula, com a combustão de parte da amostra, pulverizando o bagaço, o que tornou o briquete final sem resistência mecânica. O problema foi solucionado posteriormente através de despressurizações temporárias da célula para que os voláteis escapassesem para a atmosfera. As despressurizações foram realizadas a partir de 250°C com intervalos de 5 min.

A tab. 15 mostra os resultados obtidos nos ensaios realizados:

Temperatura (°C)	300	350
Pressão (MPa)	25	25
Número de ensaios	5	5
Tempo residência (min)	90	100
Voláteis (% b.s.)	58,1 ± 0,5	40,7 ± 0,4
Carbono Fixo (% b.s.)	35,8 ± 0,5	51,9 ± 0,5
Cinzas (% b.s.)	6,1 ± 0,2	7,4 ± 0,2
Dens. média (kg/m ³)	1.240 ± 30	1.130 ± 30
PCS (kJ/kg)	20.700 ± 200	25.600 ± 200
% Aumento do PCS	19,0	47,1

Tab. 15. Parâmetros utilizados e resultados obtidos nos ensaios de briquetagem do bagaço de cana a temperaturas do início da pirólise.

Os briquetes demonstraram boa resistência mecânica com uma densidade relativamente alta quando comparada com a do bagaço "in natura" ou o carvão de bagaço pulverizado. O briquete produzido a 300°C proporcionou teores de voláteis e carbono fixo médios enquanto que com o briquete a 350°C conseguiu-se diminuir a quantidade de voláteis praticamente pela metade em relação ao bagaço original resultando em um produto já parcialmente pirolisado que para certas utilizações energéticas já pode ser considerado como um carvão vegetal.

iv. Pirólise do bagaço "in natura" e posterior briquetagem a quente com a adição de ligante (piche vegetal):

Uma outra forma de se conseguir a briquetagem de finos de biomassa para a obtenção de carvão é através da pirólise do insumo "in natura", que no caso dos principais resíduos agroflorestais produz grande quantidade de finos e posterior compactação a quente utilizando ligantes em determinadas proporções. Nesse ítem será estudado a briquetagem do carvão de bagaço de cana utilizando como ligante piche vegetal produzido em um polimerizador [36]. O piche é obtido através da destilação do alcatrão, fração mais pesada dos voláteis condensáveis resultantes do processo de pirólise de biomassas em geral.

A metodologia do processo consiste na pirólise do bagaço de cana com taxas de aquecimento, temperaturas finais e tempos de residência controlados, havendo-se a recuperação dos voláteis condensáveis, para a posterior produção de piche vegetal através do alcatrão obtido. Em seguida mistura-se em proporções determinadas o carvão e o piche previamente moído e classificado. Segue-se a briquetagem com temperaturas e pressões controladas. O resultado é um briquete com maior densidade e resistência quando comparado com briquetes de carvão produzidos com a técnica

de briquetagem a quente e posterior pirólise utilizada no ítem i deste capítulo, sendo essa a principal vantagem da utilização da briquetagem de carvão e piche.

O bagaço utilizado nos ensaios de pirólise é o mesmo caracterizado no ítem i deste capítulo. O piche é caracterizado na tab. 16:

Ponto de amolecimento (°C)	108
Densidade (kg/m ³)	1.240
Composição (%)	
C	70,4
H	6,3
N	0,6
O	22,5
Cinzas	0,2

Tab. 16. Caracterização do piche utilizado como ligante [36].

Foi realizada a pirólise do bagaço seco em três condições diferentes com a utilização do sistema de pirólise com atmosfera inerte de nitrogênio e recuperação dos voláteis. Os ensaios são descritos na tab. 17, bem como os resultados da análise imediata, densidade média , PCS e % de aumento do PCS em relação ao bagaço original do carvão obtido.

Número do Ensaio	1	2	3
Temperatura Final (°C)	400	450	500
Taxa de Aquecimento (°C/min)	2	2	2
Tempo Resid. a Temp Final (min)	30	30	30
Massa de carvão produzido (kg)	1,5	1,3	1,0
Voláteis (% b.s.)	$38,7 \pm 0,4$	$32,3 \pm 0,4$	$25,3 \pm 0,4$
Carbono Fixo (% b.s.)	$57,5 \pm 0,5$	$63,0 \pm 0,5$	$68,0 \pm 0,5$
Cinzas (% b.s.)	$3,8 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,2$	$6,7 \pm 0,2$
Dens. média (kg/m³)	115 ± 5	105 ± 5	100 ± 5
PCS (kJ/kg)	27.300 ± 200	28.500 ± 200	29.600 ± 200
% Aumento do PCS	57,8	64,7	71,1

Tab. 17. Parâmetros utilizados e propriedades do carvão obtido nos ensaios de pirólise de bagaço de cana seco.

O rendimento médio em massa de carvão no processo é em torno de 40%, enquanto que a produção média de piche se encontra por volta de 10% [37] da massa do bagaço inicial. Por decantação dos líquidos não condensáveis separa-se o alcatrão (fração mais pesada) do ácido pirolenhoso. Por destilação do alcatrão separa-se o piche dos ácidos orgânicos. Na fig. 14 tem-se o fluxograma do processo de produção de piche e carvão utilizados na briquetagem [38]:

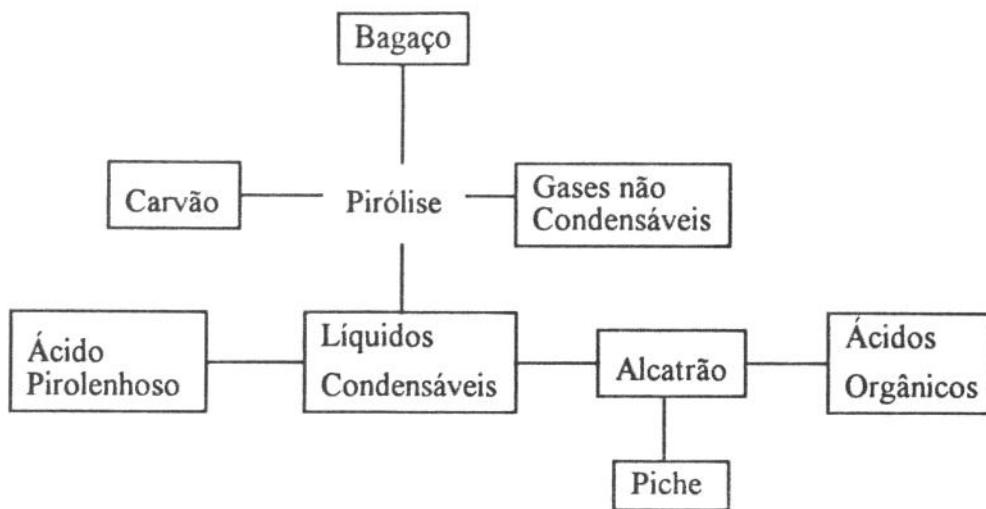


Fig. 14. Fluxograma do processo de produção de piche e carvão a partir da pirólise do bagaço de cana [33].

A seguir foram realizados ensaios para a briquetagem do carvão de bagaço e piche vegetal com os parâmetros descritos abaixo:

- *Composição:* Foram utilizados para os ensaios de briquetagem os três tipos de carvão descritos na tab. 17. O piche foi produzido no polimerizador de bancada [36] e já caracterizado na tab. 16. Posteriormente foi moído e peneirado na granulometria de 30 mesh.

Para determinar a proporção ideal carvão e piche foram realizados ensaios utilizando as seguintes composições em massa:

Carvão (%)	Piche (%)
80	20
75	25
70	30
60	40

- Características mecânicas:

Verificou-se que os ensaios realizados no sistema de briquetagem a quente com as proporções de 20 e 25% de piche resultaram em briquetes instáveis que esfarelaram facilmente, até mesmo quando eram retirados da célula após a briquetagem, enquanto que a proporção de 30% de piche já proporcionou briquetes estáveis com boa resistência mecânica, o mesmo ocorrendo com a quantidade de 40% resultando em briquetes semelhantes aos de 30%.

É interessante ter-se um briquete com a menor quantidade possível de piche, (com o aumento da quantidade de piche aumenta-se os voláteis reduzindo-se o PCS além de aumentar os custos de produção) desde que não comprometa sua resistência mecânica, portanto, tem-se que o melhor resultado para a proporção carvão-piche é de 30% piche e 70% carvão.

- *Temperatura de Briquetagem:* O aquecimento da mistura é necessário, pois o piche só possui propriedades ligantes a temperaturas acima do seu ponto de amolecimento, ou seja, à temperatura na qual passa a ter propriedades plásticas. Os briquetes produzidos a 250°C obtiveram resistência mecânica superior aos produzidos a 200°C que esfarelaram mais facilmente. Com isso, a maioria dos ensaios foram realizados a 250°C.

- *Pressão de briquetagem:* A pressão de briquetagem influencia diretamente a densidade do briquete, fator que limita o raio de transporte e o armazenamento do carvão. Os ensaios foram realizados à pressões de 15 e 20 MPa, obtendo-se melhores resultados com pressões de 20 MPa.

A tab. 18 descreve os ensaios de briquetagem realizados com os parâmetros de temperatura, pressão, composição, temperatura final da pirólise do carvão utilizado e o número de ensaios com os parâmetros descritos.

Designação do ensaio	Temper. (°C)	Pressão (MPa)	Carvão (%) em massa)	Piche (%) em massa)	Temp. final pirólise (°C)	Num. de ensaios
A	200	15	70	30	400	2
B	200	20	70	30	400	3
C	250	15	70	30	400	3
D	250	20	70	30	400	6
E	250	20	75	25	400	3
F	250	20	80	20	400	3
G	250	20	60	40	400	3
H	250	20	70	30	450	6
I	250	20	70	30	500	6

Tab. 18. Parâmetros utilizados na briquetagem do carvão de bagaço com piche como ligante.

Os melhores resultados de consistência mecânica foram obtidos nos ensaios D, H e I, com temperaturas de briquetagem de 250°C, pressão de briquetagem de 20 MPa, composição de 30% de piche e 70% de carvão e temperatura final de pirólise respectivamente de 400, 450 e 500°C.

A tab. 19 descreve os resultados de análise imediata, densidade média, PCS e % do aumento do PCS em relação ao bagaço original dos briquetes dos ensaios D, H e I.

Ensaio	D	H	I
Voláteis (% b.s.)	$45,6 \pm 0,4$	$35,1 \pm 0,4$	$33,2 \pm 0,4$
Carbono Fixo (% b.s.)	$50,3 \pm 0,5$	$59,1 \pm 0,5$	$60,8 \pm 0,5$
Cinzas (% b.s.)	$4,1 \pm 0,2$	$5,8 \pm 0,2$	$6,0 \pm 0,2$
Densidade média (kg/m ³)	1.370 ± 30	1.400 ± 30	1.420 ± 30
PCS (kJ/kg)	24.500 ± 200	26.400 ± 200	27.800 ± 200
% Aumento do PCS	41,6	52,6	60,7

Tab. 19. Análise imediata (B.S.), densidade média, PCS e % de aumento do PCS em relação ao bagaço original dos briquetes de carvão de bagaço e piche vegetal descritos na tab. 18.

Analizando a tab. 19 verifica-se que a densidade do briquete é em média cerca de 14 vezes a densidade do carvão de origem (tab. 17). Tem-se também um aumento da quantidade de voláteis no briquete em relação ao carvão inicial, devido a introdução do piche, tornando-se assim, um fator de limitação ao uso do briquete para determinados fins que exigem limitação na quantidade de voláteis presentes no carvão, como é o caso do uso siderúrgico em substituição ao coque redutor. É necessário nesse caso a realização de um tratamento térmico de calcinação para a retirada desses voláteis.

O briquete produzido apresenta alta densidade e resistência mecânica, resultando em um produto que em escala industrial oferece menores custos de transporte e armazenamento, além de possuir formato geométrico específico, podendo substituir com vantagens carvões energéticos devido ao seu alto poder calorífico.

v.Preparação e tratamento de briquetes, caracterização dos insumos e produtos, utilizando como matéria-prima a palha de cana:

A palha de cana atualmente no Brasil é totalmente queimada para facilitar a colheita da cana, perdendo-se desse modo, grande quantidade de energia que poderia ser utilizada de forma mais racional. Representa cerca de 30% em peso do total da planta, com índices de aproveitamento em alguns casos de até 70% da palha total através da colheita mecanizada [6]. A tendência no país é aumentar a prática da colheita mecânica e também o aproveitamento cada vez mais intensivo da palha como energético, pois trata-se de um grande potencial que não pode ser desprezado. Deve-se desenvolver tecnologias de colheita visando colher a palha com a menor quantidade de impurezas (terra e outros resíduos) possível, buscando evitar problemas futuros de incrustações devido à fusão dessas impurezas em caldeiras.

Ressalta-se a experiência de Cuba que realiza grande parte de sua colheita mecanicamente colhendo cana verde e armazenando a palha de cana em centros de acópio localizados próximos às usinas. Parte dessa palha é diretamente utilizada para a produção de energia ou compactada facilitando o armazenamento.

Com isso, vê-se nesse trabalho a importância, da mesma forma que para o bagaço, do desenvolvimento de metodologias para a compactação da palha de cana.

Portanto foram realizados ensaios de briquetagem de palha de cana com as seguintes características:

- *Granulometria:* A palha de cana se apresenta no formato de longas folhas com as fibras dispostas na direção longitudinal da mesma, tendo uma largura máxima de aproximadamente 8 cm e comprimento que pode chegar até mais de 2 metros. Essa disposição física prejudica a briquetagem devido ao fato da folha ser muito longa, dificultando-se a compactação e reduzindo-se a resistência do briquete. Por esse motivo a palha foi picada em pequenos pedaços de aproximadamente 3 cm de comprimento. Em instalações industriais, dependendo-se do equipamento

utilizado para a compactação deve-se verificar a vantagem energética de se picar a palha e posteriormente compactar em relação à compactação com folhas inteiras.

- Densidade média: $110 \pm 20 \text{ kg/m}^3$

- Umidade (b.u.): $12 \pm 1 \%$

- Análise Imediata (b.s.):

Voláteis: $77,1 \pm 0,6 \%$

Carbono Fixo: $16,3 \pm 0,3\%$

Cinzas: $6,6 \pm 0,3 \%$

- PCS: $17.100 \pm 200 \text{ kJ/kg}$

A metodologia dos ensaios de briquetagem nesta etapa seguiram a mesma metodologia dos ensaios realizados no ítem i deste capítulo que utilizou como matéria-prima o bagaço de cana, ou seja, compactou-se a palha de cana picada à temperaturas de pré-pirólise (temperaturas dos melhores ensaios obtidos com o bagaço) utilizando-se das propriedades termoplásticas a essas temperaturas. Os ensaios foram realizados a 200 e 250°C. Verificou-se que para a obtenção de briquetes com resistência mecânica semelhantes aos briquetes de bagaço obtidos anteriormente foi necessária a aplicação de uma pressão um pouco superior. Os ensaios foram realizados com pressões de 20 e 25 MPa, obtendo-se briquetes com melhores propriedades mecânicas a 25 MPa.

A tab. 20 mostra a caracterização dos briquetes produzidos:

Temperatura (°C)	200	250
Pressão (MPa)	25	25
Número de ensaios	6	6
Tempo residência (min)	70	80
Voláteis (% b.s.)	$72,5 \pm 0,6$	$65,2 \pm 0,6$
Carbono Fixo (% b.s.)	$20,7 \pm 0,4$	$27,0 \pm 0,4$
Cinzas (% b.s.)	$6,8 \pm 0,2$	$7,8 \pm 0,2$
Dens. média (kg/m ³)	1.100 ± 30	1.050 ± 30
PCS (kJ/kg)	17.800 ± 200	19.300 ± 200
% Aumento do PCS	4,1	12,8

Tab. 20. Análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e % aumento do PCS em relação à palha original dos ensaios de briquetagem a quente da palha de cana.

Os melhores resultados em resistência mecânica foram obtidos com temperaturas de 200°C e pressões de briquetagem de 25 MPa. Os briquetes a 250°C em alguns casos esfarelaram-se quando foram retirados da matriz da célula. Verificou-se um aumento em torno de 9 vezes da densidade do briquete em relação à palha de cana utilizada. Quanto à quantidade de voláteis, houve uma pequena redução em relação à palha inicial, devido ao fato de se tratarem de briquetes produzidos à temperaturas de pré-pirólise, onde a devolatilização ainda é pequena. O PCS se apresentou ligeiramente menor que os encontrados para o bagaço nas mesmas condições de ensaio, atestando uma qualidade ligeiramente inferior para os briquetes de palha de cana.

- Tratamento térmico de pirólise com atmosfera inerte e caracterização dos briquetes obtidos:

Nesta etapa é realizada a pirólise dos briquetes de palha de cana produzidos à temperaturas de 200 e 250°C e pressões de 25 MPa utilizando o sistema de pirólise com atmosfera de nitrogênio. As condições foram taxas de aquecimento de 2°C/min e temperatura final de 400°C. A tab. 21 descreve a análise imediata, densidade média, PCS e % aumento do PCS em relação à palha original dos briquetes pirolisados:

Voláteis (% b.s.)	Carbono Fixo (% b.s.)	Cinzas (% b.s.)	Dens. Média (kg/m ³)	PCS (kJ/kg)	% Aum. PCS
26,5 ± 0,4	57,9 ± 0,5	15,6 ± 0,3	500 ± 20	25.900 ± 200	51,5

Tab. 21. Análise imediata (B.S.), densidade média, PCS e % de aumento do PCS em relação à palha original dos briquetes de palha de cana produzidos a 250°C e 25 MPa e pirolisados a taxa de aquecimento de 2° C/min com temperatura final de 400°C.

Os briquetes pirolisados de palha de cana demonstraram resistência mecânica inferiores aos briquetes de bagaço de cana produzidos sob as mesmas condições, esfarelando-se mais facilmente, embora ainda se mantenha a resistência a pequenos esforços. Por esse motivo é preferível a utilização desses briquetes sem a etapa de pirólise, pois nessa fase possuem consistência satisfatória.

vi. Briquetagem e pirólise utilizando como matéria-prima serragem derivada de indústria madereira:

A serragem é um resíduo produzido no processamento da madeira, podendo assim ser considerada como um resíduo florestal. São lascas ou finos de madeira não utilizados pela indústria, por serem de dimensões pequenas quando comparados com os produtos principais. Pode-se considerar que cerca de 20% da madeira total é transformada em serragem no processo de industrialização, sendo que essa quantia atualmente é desprezada como matéria-prima para a indústria madereira [13].

A serragem utilizada para os ensaios realizados foi obtida de uma marcenaria de fabricação de móveis, sendo de origem heterogênea. As principais características são citadas abaixo:

- Granulometria: Lascas de aproximadamente 0,5 mm de espessura com comprimento e largura variando entre 5 a 50 mm.
- Densidade Média: $180 \pm 20 \text{ kg/m}^3$.
- Umidade (b.u.): $10 \pm 1 \%$
- Análise Imediata (b.s.):
 - Voláteis: $76,2 \pm 0,6 \%$
 - Carbono Fixo: $22,8 \pm 0,6 \%$
 - Cinzas: $1,0 \pm 0,1 \%$
- PCS: $19.300 \pm 200 \text{ kJ/kg}$

A serragem, devido à sua constituição física mostrou-se de mais fácil manuseio em relação ao bagaço e a palha de cana, o que veio a facilitar a realização dos ensaios de compactação.

Os ensaios de briquetagem foram realizados em condições semelhantes do bagaço no ítem i e palha de cana no ítem v deste capítulo. As temperaturas utilizadas foram de 200 e 250°C com pressões de 20 MPa. Os briquetes produzidos com esses

parâmetros adquiriram boa resistência mecânica, superior aos briquetes de bagaço e palha de cana obtidos com ensaios realizados com os mesmos parâmetros. Verifica-se portanto que a serragem é uma matéria-prima de qualidade superior ao bagaço e a palha de cana quando o objetivo é a produção de briquetes explorando as propriedades termoplásticas de biomassa na pré-pirólise.

A tab. 22 mostra a caracterização dos briquetes produzidos com serragem:

Temperatura (°C)	200	250
Pressão (MPa)	20	20
Número de ensaios	6	6
Tempo residência (min)	70	80
Voláteis (% b.s.)	$75,9 \pm 0,6$	$74,6 \pm 0,6$
Carbono Fixo (% b.s.)	$23,0 \pm 0,4$	$24,3 \pm 0,4$
Cinzas (% b.s.)	$1,1 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$
Dens. média (kg/m ³)	1.120 ± 30	1.080 ± 30
PCS (kJ/kg)	20.000 ± 200	20.400 ± 200
% Aumento PCS	3,6	5,6

Tab. 22. Análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e aumento do PCS em relação à serragem original dos briquetes produzidos com serragem

A análise imediata nos dois casos de temperatura de tratamento demonstra que as propriedades não variaram muito em relação à matéria-prima inicial, mantendo-se a quantidade de voláteis e carbono fixo praticamente nos mesmos níveis anteriores ao tratamento. Isso significa que o briquete possui características próximas a da madeira de origem com boa resistência mecânica. O PCS apresentou-

se maior que os briquetes de bagaço e palha de cana, atestando em todos os parâmetros analisados uma maior qualidade dos briquetes de serragem.

A seguir realizou-se a pirólise dos briquetes produzidos. Os parâmetros utilizados foram taxa de aquecimento de 2°C/min e temperatura final de 400°C. Os briquetes pirolisados apresentaram-se com boa resistência mecânica, esfarelando-se com menor facilidade em relação aos produzidos com bagaço e palha de cana sob as mesmas condições.

A tab. 23 descreve a análise imediata (b.s.), densidade média, PCS e % de aumento do PCS em relação à serragem original dos briquetes pirolisados:

Voláteis (% b.s.)	Carbono Fixo (% b.s.)	Cinzas (% b.s.)	Dens. Média (kg/m ³)	PCS (kJ/kg)	% Aum. PCS
29,3 ± 0,4	60,2 ± 0,5	10,5 ± 0,3	570 ± 20	27.500 ± 200	42,5

Tab. 23. Análise imediata (b.s.), densidade média e PCS dos briquetes de serragem produzidos a 250°C e 25 MPa e pirolisados a taxa de aquecimento de 2°C/min com temperatura final de 400°C.

A serragem, dentre os três insumos analisados nos ensaios, demonstrou melhores resultados em termos da facilidade de compactação, boa resistência mecânica dos briquetes que não esfarelaram facilmente quando comparado com os produzidos anteriormente.

vii. Análise dos Resultados do PCS e Densidade:

O PCS é uma grandeza que pode ser usada para se comparar combustíveis semelhantes como por exemplo os combustíveis sólidos analisados neste trabalho. Para os briquetes produzidos pode-se considerar que os de maior PCS são de melhor qualidade em relação a outros de menor PCS, pois possuem maior energia por unidade de massa disponível na combustão. Ressalta-se que deve ser levado em consideração para determinados usos outros fatores como a consistência mecânica, densidade, carbono fixo, teores de cinzas e outras impurezas.

A seguir serão feitas análises através da comparação do PCS medido de alguns briquetes produzidos:

A fig. 15 mostra um gráfico do PCS de briquetes de bagaço de cana em função da temperatura de briquetagem, onde verifica-se que com o aumento da temperatura de briquetagem o valor do PCS aumenta:

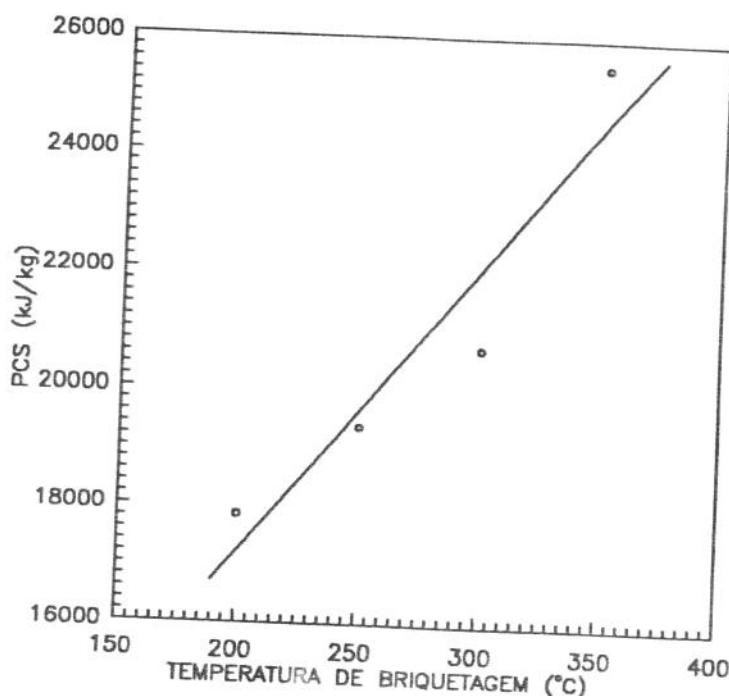


Fig. 15. Gráfico do PCS dos briquetes de bagaço de cana em função da temperatura de briquetagem.

Outra análise importante a ser feita é a comparação de briquetes de insumos diferentes compactados nos mesmos parâmetros de briquetagem. Na fig. 16 tem-se o gráfico do PCS de briquetes compactados a 250°C utilizando bagaço, palha de cana e serragem. Pelo gráfico de barras verifica-se que a serragem possui o mais alto valor de PCS seguido pelo bagaço e pela palha de cana.

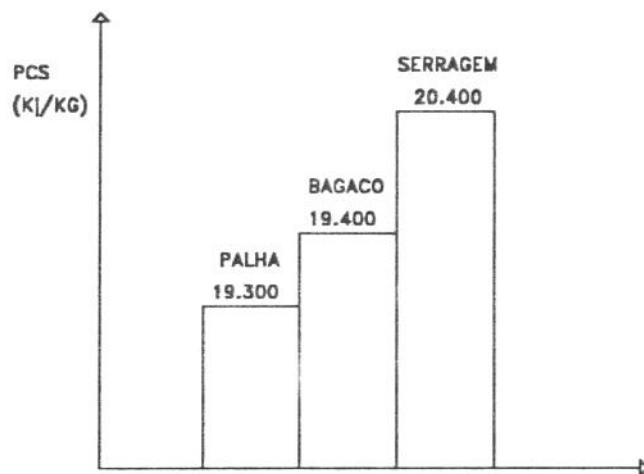


Fig. 16. Gráfico do PCS dos briquetes de serragem, bagaço e palha de cana compactados a 250°C.

Da mesma forma a fig. 17 analisa o PCS dos briquetes pirolisados a taxa de aquecimento de 2°C/min e temperatura final de 400°C utilizando os mesmos insumos da fig. 16. O resultado mostrou novamente o briquete de serragem com o maior PCS seguido do bagaço e palha de cana.

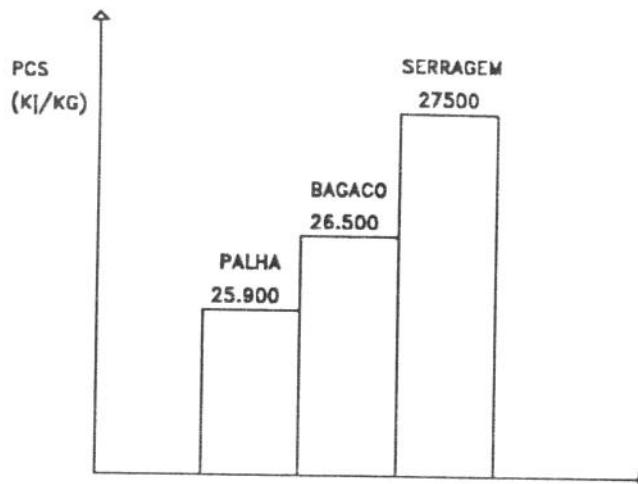


Fig. 17. Gráfico dos briquetes pirolisados de serragem, bagaço e palha de cana a taxas de aquecimento de 2°C/min e temperatura final de pirólise de 400°C.

A densidade do briquete é uma grandeza importante quando objetivo é reduzir custos de transporte e armazenagem, e também quando se deseja um uso siderúrgico, onde é necessário alta resistência mecânica. Na prática, deve-se procurar obter uma densidade mínima que se obtenha uma resistência mecânica satisfatória ao briquete, levando-se em consideração os custos envolvidos para se chegar a essa densidade [39]. A fig. 18 mostra a variação da densidade com os parâmetros de pressão e temperatura de briquetagem nos ensaios do ítem i deste capítulo. Percebe-se que a densidade varia diretamente com a pressão imposta ao briquete.

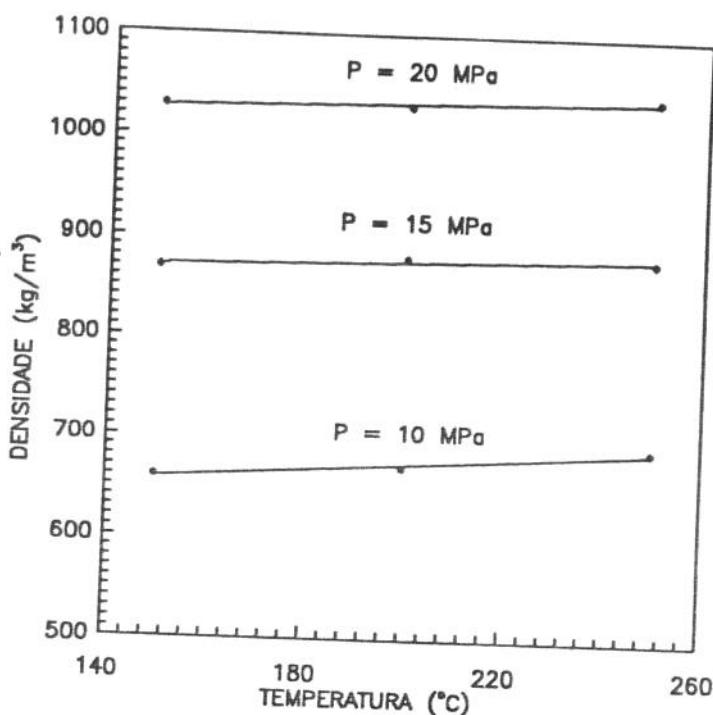


Fig. 18. Variação da densidade do briquete em função da pressão e temperatura de briquetagem nos ensaios do ítem i.

Deve-se ressaltar que a tentativa de se aumentar o PCS geralmente vem aliada a um aumento de custos devido à necessidade de tratamentos adicionais como a pirólise através de aquecimento em atmosfera inerte com o objetivo de aumentar o teor de carbono fixo e consequentemente o PCS. Esse tipo de tratamento irá depender do uso a que será submetido o briquete, por exemplo, se for utilizado para a geração de vapor não há necessidade de tratamento térmico posterior à compactação, enquanto que se o objetivo for obtenção de carvão siderúrgico para a redução do ferro em auto-fornos é necessário alto teor de carbono fixo, sendo preciso para isso um tratamento térmico de pirólise. Portanto deve-se para cada caso

realizar-se uma análise das características necessárias do briquete e dos custo envolvidos em sua produção comparando-o com materiais semelhantes atualmente disponíveis no mercado energético como por exemplo lenha e carvão vegetal.

Para conseguir-se um produto a preço competitivo no mercado utilizando-se resíduos agroflorestais é necessário que os custos do processo de compactação e tratamento térmico sejam ligeiramente inferiores ao preço da lenha no mercado energético, já que esses resíduos apresentam um preço de comercialização relativamente baixos.

No Brasil é realizada já em escala industrial a briquetagem de serragem principalmente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, onde já possui competitividade no mercado da lenha que na região já se torna escassa e também substitui em parte o óleo combustível na geração de vapor em indústrias têxteis devido a restrições ambientais impostas à queima do óleo (região de Blumenau e Joinville - SC) [3]. Na Europa e principalmente nos EUA, a briquetagem já é utilizada em larga escala desde meados do século, existindo um grande mercado para esses produtos, onde o custo de produção é competitivo com o preço de outros combustíveis semelhantes [29].

Do ponto de vista ambiental a utilização de briquetes de resíduos agroflorestais viria diminuir a exploração de madeira para a produção de lenha que em muitos casos causa devastação de florestas nativas, limitando a extração somente a áreas de reflorestamento.

V. Aspectos técnico-econômicos.	87
<i>V.a. Estimativa da viabilidade econômica de uma planta de briquetagem de bagaço de cana.</i>	87
<i>V.b. Preços de mercado de produtos compactados derivados de resíduos agroflorestais.</i>	98
<i>V.c. Descrição de mercados potenciais para o consumo e principais usos de briquetes de resíduos agroflorestais.</i>	100

V. Aspectos Técnico-Econômicos:

V.a. Estimativa da Viabilidade Econômica em uma Planta de Briquetagem de Bagaço de Cana.

O objetivo desta etapa é estimar as condições de operação de uma planta de briquetagem de bagaço de cana em uma usina de açúcar e álcool através de uma comparação entre o produto final (briquete verde ou pirolisado) com combustíveis tradicionalmente comercializados no mercado energético (lenha, carvões vegetais e coque siderúrgico).

Serão utilizados alguns parâmetros de briquetagem obtidos em ensaios laboratoriais realizados no capítulo anterior, bem como dados obtidos de estudos bibliográficos.

Os preços de comercialização da lenha, carvão vegetal e coque foram obtidos através de consultas à empresas ligadas à siderurgia localizadas na região de Belo Horizonte (MG). Os valores utilizados são preços médios de agosto de 1993.

Lenha:

Preço de comercialização:

- 18 US\$/t {1}

$$\text{Poder Calorífico (25% umidade)} = 13.800 \text{ kJ/kg} \quad [2]$$

$$\text{Densidade} = 360 \text{ kg/m}^3$$

Carvão Vegetal: (Nativo)

Preço de comercialização:

- 80 US\$/t {2} {3}

Poder Calorífico (seco) = 28.400 kJ/kg [2]

Densidade = 250 kg/m³

obs: Floresta Plantada: Atualmente não existem dados de preços de mercado específicos para carvões de floresta plantada devido a não utilização deste insumo em larga escala. O carvão de floresta plantada obedece o preço de floresta nativa {1}.

A utilização das árvores reflorestadas será feita somente a partir de 1998. {1}

Coque Siderúrgico: (Posto na Siderúrgica) {2}

Origem:

- Japão: 110 US\$/t
- Polônia: 114 US\$/t
- Austrália: 114 US\$/t
- China: 100 US\$/t

A proporção carvão vegetal/coque para produzir a mesma quantidade de aço é:

$$1 \text{ t coque} = 1,25 \text{ t carvão} \quad \{2\}$$

Bagaço de Cana (50% umidade - b.u.): [6]

Preço de Comercialização:

- 6 a 11 US\$/t

Custo para a usina:

- 6 US\$/t

Poder Calorífico (50% umidade - b.u.) = 10.000 kJ/kg

Densidade: 120 kg/m³

Energia Elétrica Industrial:

Custo: 60 US\$/MWh {4}

Custo de Transporte do Bagaço ou Briquete: [6]

Custo [US\$/($t \times km$)] $\approx 1,8 + 0,047 \times km$ (US\$/t)

Exemplo:

O custo para transportar 10 t¹ de bagaço ou briquete por 30 km é dado por:

$$\text{Custo} = (1,8 + 0,047 \times 30) \times 10$$

$$\underline{\text{Custo}} = 32 \text{ US\$}$$

¹ Carga transportada em um caminhão comum com um eixo, sem nenhuma característica especial.

Considerações utilizadas para o processo:

O processo proposto nesta estimativa será a briquetagem a quente utilizando como equipamentos uma extrusora termoplástica adaptada para as condições de compactação de biomassa e para a pirólise, um pirolisador horizontal contínuo com a utilização dos gases de pirólise para a geração de calor de processo e recuperação do líquido pirolenhoso e alcatrão.

A planta deverá ser instalada dentro da usina sucroalcooleira evitando-se assim, custos de transporte da matéria-prima.

Os parâmetros do processo serão a briquetagem a 200°C e pirólise com taxas de aquecimento de 2°C/min com temperatura final de 400°C.

Como exemplo será estudada a produção de 1 ton de briquete seco.

Balanço de massa: Para a produção de 1 t de briquete seco é necessário a utilização de 2 t de bagaço a 50 % de umidade - b.u.

Para a produção de 1 t de carvão através da pirólise são necessários 3 t de briquetes.

Relatório de custos do processo:

- Bagaço (50% umidade - b.u.): 6 US\$/t

Custo total: 2 t - 12 US\$

- Consumo de energia no pré-aquecimento do bagaço para a compactação:
Bagaço (50% umidade - b.u.)

Composição: 1 kg bagaço

1 kg água

Temp. Final: 200°C

Será realizada uma estimativa da energia necessária para a secagem do bagaço a 100°C mais o aquecimento a 200°C utilizando resultados experimentais obtidos pela CHESF em um secador de bagaço ("Flash Dryer"). Fig. 19 [20]

Nomenclatura:

Q_w : Calor teórico necessário à secagem

p_w : Perdas térmicas no secador durante a secagem

$$Q = Q_w + p_w$$

Q_s : Calor necessário à secagem de 2 kg (50% umidade - b.u.); $Q_s = 2Q$

Q_A : Calor teórico necessário ao aquecimento a 200°C

p_A : Perdas térmicas durante o aquecimento

$$Q_B = Q_A + p_A$$

$$Q_T = Q_s + Q_B$$

Equação empírica: $p = 0,35 (Q + p)$ tab. 24

[20]

Para umidade = 0%

T=100°C

$$Q_w = 1.300 \text{ kJ/kg}$$

tab. 24

$$p_w = 700 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = Q_w + p_w = 2.000 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_s = 2 \times 2.000 = 2.000 \text{ kJ}$$

Calor necessário ao aquecimento de 100 a 200°C

Bagaço Seco:

$$Q_A = m \cdot c_{bag} \cdot (T_F - T_I)$$

$$T_F = 200^\circ\text{C}$$

$$T_I = 100^\circ\text{C}$$

$$c_{bag} = 2,1 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \quad [7]$$

$$m = 1\text{kg}$$

$$Q_A = 1,2,1 \cdot (200-100)$$

$$\underline{Q_A = 210 \text{ kJ}}$$

$$p_A = 0,35 (Q_A + p_A)$$

$$\underline{p_A = 113 \text{ kJ}}$$

$$Q_B = Q_A + p_A$$

$$\underline{Q_B = 323 \text{ kJ}}$$

$$Q_T = Q_S + Q_B$$

$$\underline{Q_T = 4.323 \text{ kJ}}$$

- Cálculo do bagaço a ser queimado:

$$PC_{(50\% \text{ umidade - b.s.})} = 9.400 \text{ kJ/kg}$$

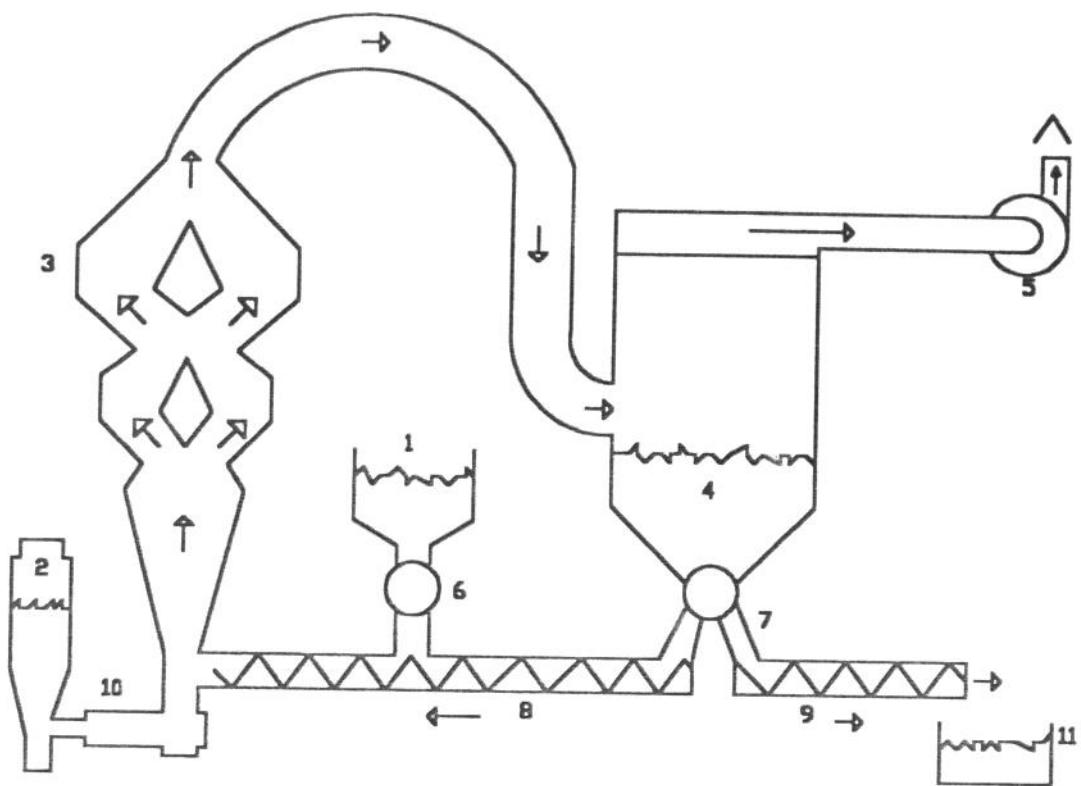
Quantidade a ser queimada:

0,45 kg bag./ kg bag. a ser aquecido

- Custos:

$$\text{Bagaço}_{(50\% \text{ umidade})} = 6 \text{ US\$/t}$$

$$\underline{\text{Custo Total: } 2,7 \text{ US\$/ t}_{\text{bag. aquecido}}}$$



1. Alimentador de Bagaço Úmido
2. Combustor Gerador de Gás Quente
3. Secador
4. Ciclone
5. Exaustor
6. Válvula Dosadora
7. Válvula Dosadora
8. Transportador Alimentador de Bagaço Úmido
9. Transportador de Bagaço Pós-Secagem
10. Misturador de Ar e Gás Quente
11. Bagaço Pós-Secagem

Fig. 19. Secador "Flash Dryer" [20]

Umidade Remanescente (% b.u.)	Calor de Secagem (kJ/kg)	Perdas Térmicas (kJ/kg)	$Q_w + p$ (kJ/kg)
40	598	323	920
35	744	401	1.145
30	865	468	1.333
25	974	523	1.497
20	1.066	577	1.643
15	1.150	619	1.769
10	1.225	660	1.885
0	1.300	700	2.000

Tab. 24. Calor necessário à secagem do bagaço de cana em função da umidade remanescente [20].

obs.: 1. "Q_w" e "p" referidos a 1 kg de bagaço a 50% umidade - b.u.

2. p = 0,35 (Q_w + p).

- Consumo de Energia na Compactação:

Através da consulta a catálogos de extrusoras termoplásticas [40] pode-se estimar um valor médio do consumo de energia (elétrica) utilizada para a compactação do bagaço:

Consumo: 10 a 14 kWh para a produção de 100 kg/h [40]

Custo do MWh: 60 US\$

Para a produção de 1 t de briquete:

Custo: 6 a 8 US\$

Custo médio: 7 US\$

Portanto a estimativa dos *gastos totais* do processo para a produção de 1 t de briquete seco são:

- Bagaço: 2 t (50% umidade - b.u.): 12 US\$

- Aquecimento: 3 US\$

- Compactação: 7 US\$

$$\Sigma \text{Custos} = 22 \text{ US\$}/\text{t}_{\text{briquete}}$$

O briquete é produzido com cerca de 0% umidade b.u. com o poder calorífico (calculado nos ensaios laboratoriais):

$$- \text{PC} = 17.500 \text{ kJ/kg} \quad \text{Custo} = 22 \text{ US\$}/\text{t}$$

Para a lenha (25% umidade) utilizada comercialmente:

$$- \text{PC} = 13.800 \text{ kJ/kg} \quad \text{Custo} = 18 \text{ US\$}/\text{t}$$

Calculando-se a relação do custo por unidade energética do briquete e da lenha tem-se:

Lenha: 1,30 US\$/10³ MJ

Briquete: 1,26 US\$/10³ MJ

Verifica-se portanto, através dessa análise preliminar a viabilidade econômica em favor da produção de briquetes de bagaço na usina sucroalcooleira visando a substituição da lenha em mercados regionais. Ressalta-se que a mudança em qualquer dos parâmetros analisados modificaria o resultado obtido, que seria alvo de outra análise e conclusões.

O mercado alvo é a geração de energia em indústrias próximas à usina. A vantagem do briquete em relação ao bagaço estão no maior poder calorífico, menor umidade e maior densidade, o que resulta em menores custos de transporte e maiores preços de comercialização.

Pirólise:

A pirólise dos briquetes pode ser realizada por um pirolisador horizontal tipo FRAMATOME [41] com recirculação do gás de pirólise para fornecer energia de processo.

O consumo de energia elétrica para a produção de 1 t de briquetes pirolisados é ao redor de 90 kWh [41] utilizada principalmente para a circulação do gás de pirólise combustível.

Através da condensação dos voláteis, o equipamento produz alcatrão e líquido pirolenhoso que pode ser comercializado para a obtenção de produtos químicos.

O rendimento mássico do processo é de aproximadamente 1 ton de carvão para 3 ton de briquete pirolisado (~ 33%).

Para a produção de 1 t de carvão tem-se:

- Matéria-prima - 3 ton briquete verde

Custo: 66,6 US\$

- Consumo de energia - 90 kWh

Custo: 5,4 US\$

$$\Sigma \text{Custos} = 72 \text{ US\$/t}_{\text{briq. pirol.}}$$

Tem-se que:

$$- PC_{\text{briq. pirol}} = 26.500 \text{ kJ/kg} \quad \text{Custo} = 72 \text{ US\$/t}$$

$$- PC_{\text{carvão veg}} = 28.400 \text{ kJ/kg} \quad \text{Custo} = 80 \text{ US\$/t}$$

A relação do custo por unidade energética do briquete de carvão e do carvão vegetal é dado por:

- Briquete pirolisado: 2,72 US\$/10³ MJ
- Carvão vegetal: 2,81 US\$/10³ MJ

Verificou-se, portanto, um preço ligeiramente inferior do briquete pirolisado em relação ao carvão vegetal atualmente utilizado. Em uma primeira análise existe a viabilidade de se instalar plantas de briquetagem próximas aos centros consumidores.

- Coque Metalúrgico:

Preço médio: 110 US\$/t

Equivalência média na produção do aço: 0,8t coque = 1 t carvão vegetal

Preço (0,8 t coque)= 88 US\$

A relação do custo por unidade energética do briquete de carvão e do coque é dado por:

- Briquete pirolisado: 2,72 US\$/10³ MJ
- Coque: 3,10 US\$/10³ MJ

Da mesma forma que para a lenha e o carvão vegetal, o briquete apresenta um custo ligeiramente inferior em relação ao coque importado.

Através da estimativa realizada verifica-se a viabilidade de se instalar plantas de briquetagem próximas aos locais de consumo. O problema principal é a distância de transporte. Para cada caso deve-se fazer uma análise do custo de transporte da matéria-prima até a planta briqueteadora ou do briquete até o consumidor final.

V.b. Preços de mercado de produtos compactados derivados de resíduos agroflorestais.

Através de relatórios fornecidos pela "Agência para Aplicação de Energia" (CESP) [3], foi realizado um levantamento de preços de dois produtos compactados derivados de resíduos agroflorestais e comparados com o preço do bagaço de cana "in natura" (50% de umidade - b.u.). Os produtos são:

-Bagaço enfardado "Bagatex S.A. - Ribeirão Preto - SP":(20 % de umidade - b.u.).

-Briquetes de serragem compactados em prensas hidráulicas e comercializados principalmente no mercado doméstico e comercial (12% de umidade - b.u.). Algumas empresas que produzem e consomem ou comercializam briquetes no estado de São Paulo são:

- Briquetes Rodas Briquetes LTDA - Capivari.
- Flamma Energéticos LTDA - Tietê.
- Energetic LTDA. - São Carlos.
- Madeireira Brasil - Rio Claro.
- Lápis Johann Faber S/A - São Carlos.

A fig. 20 fornece os preços do bagaço "in natura", do Bagatex e dos briquetes de 1988 a 1993 [3]:

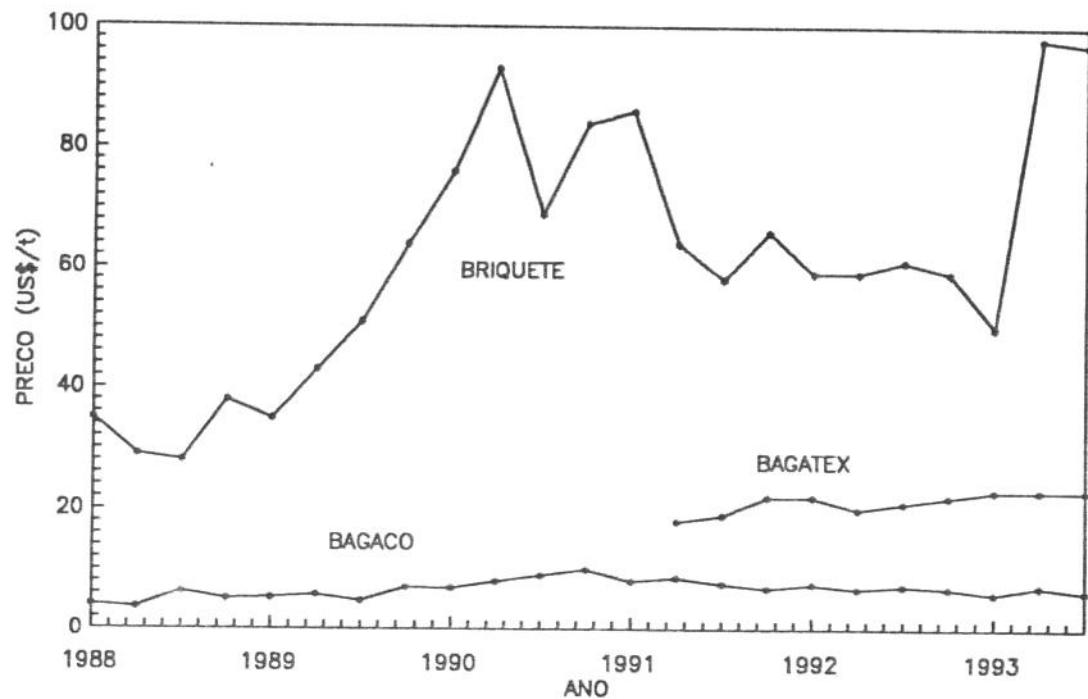


Fig. 20. Preços de mercado do bagaço "in natura", do Bagatex e dos briquetes de serragem de 1988 a 1993 [3].

V.c. Descrição de mercados potenciais para o consumo e principais usos de briquetes de resíduos agroflorestais.

Os mercados potenciais para o consumo de briquetes de resíduos agroflorestais são os que atualmente utilizam algum tipo de biomassa, principalmente lenha, para a geração de energia e carvão vegetal e coque mineral como redutor siderúrgico.

Na tab. 25 são descritos os principais consumidores de lenha, carvão vegetal e coque mineral como fonte energética ou redutor siderúrgico [2]. Esses setores são as mais prováveis fontes de consumo de briquetes, nos quais deveria ocorrer a substituição parcial dos insumos atualmente utilizados.

	Lenha (10 ³ t)	% Total	Carv. Veg. (10 ³ t)	% Total	Coque (10 ³ t)	% Total
Produção Total	88.534	100	8.787	100	8.086	88,5
Transformação (*)	38.495	43,5	-	-	-	-
Importação	-	-	-	-	1.054	12,5
Residencial	25.583	28,9	950	10,8	-	-
Comercial	350	0,4	85	1,0	-	-
Público	6	0	5	0,1	-	-
Agropecuário	6.800	7,7	20	0,2	-	-
Transporte. Ferroviário	5	0	-	-	-	-
Cimento	-	-	387	4,4	-	-
Mineração/Pelotização	-	-	55	0,6	140	1,5
Não Ferr. e outros Metal.	89	0,1	393	4,5	98	1,1
Química	680	0,7	45	0,5	-	-
Alimentos e Bebidas	6.467	7,3	-	-	-	-
Têxtil	475	0,5	5	0,1	-	-
Papel e Celulose	2.596	2,9	-	-	-	-
Cerâmica	4.783	5,5	18	0,2	-	-
Ferro Gusa e Aço (**)	-	-	6.234	70,9	8.864	97,0
Ferro Ligas (**)	-	-	565	6,4	38	0,4
Outros	2.205	2,5	25	0,3	-	-

Tab. 25. Principais consumidores de lenha, carvão vegetal e coque mineral como fonte energética ou redutor siderúrgico [2].

(*) O ítem transformação corresponde à lenha utilizada para a produção de carvão vegetal.

(**) Os ítems ferro gusa e aço e ferro ligas correspondem ao consumo de carvão vegetal em siderúrgicas com a finalidade da redução do ferro para a produção de aço (carvão siderúrgico).

Verifica-se que os maiores consumidores de lenha são setores residenciais, agropecuário e as indústrias de alimentos e bebidas e cerâmica, sendo que quase metade da consumo total é destinado à produção de carvão vegetal. São para esses setores que deve ser direcionada a produção de briquetes, onde o objetivo é instalar plantas de briquetagem próximas às instalações consumidoras, visando a substituição parcial dessa lenha por briquetes de resíduos agroflorestais.

Para o carvão vegetal e o coque mineral os maiores consumidores são as indústrias siderúrgicas que utilizam-os como redutor do ferro na produção do aço. Cerca de 80% desse consumo localiza-se no estado de Minas Gerais, devido a sua grande atuação na siderurgia [42]. O carvão siderúrgico necessita de algumas propriedades como alta consistência, alto conteúdo de carbono, baixo teor de cinzas e formato geométrico definido que podem ser conseguidos através de tratamentos térmicos e mecânicos com briquetes de resíduos agroflorestais. Seria interessante a instalação de plantas de briquetagem próximas às siderúrgicas utilizando como matéria-prima resíduos do processamento de madeiras não aproveitáveis na indústria ou gramíneas cultivadas especialmente para a produção de briquetes.

No uso residencial ou doméstico ressalta-se principalmente o preparo de churrascos em residências e "campings" e em fornos a lenha em restaurantes padarias, pizzarias e algumas residências. A utilização doméstica de briquetes não carbonizados é bastante difundida no sudeste asiático [43] [44]. A preferência pelo briquete em churrascos é devido principalmente à maior facilidade de manuseio,

ignição, menor volume necessário, e uma brasa mais demorada e constante. O maior país consumidor neste setor é os EUA.

O uso energético de briquetes de resíduos agroflorestais pode ser feito em caldeiras industriais para a geração de vapor, com a vantagem da redução de custos de transporte e aumento do poder calorífico em relação ao material não compactado.

VI. Conclusões finais.	<i>104</i>
<i>VI.a. Equipamentos utilizados.</i>	<i>104</i>
<i>VI.b. Preparação e caracterização dos briquetes produzidos .</i>	<i>105</i>
<i>VI.c. Análise técnica-econômica-ambiental.</i>	<i>106</i>

VI. Conclusões:

VI.a. Equipamentos Utilizados.

Os equipamentos usados nos ensaios possuem características de produção e tratamento de briquetes a nível de bancada e têm como objetivo reproduzir em escala laboratorial as condições de processo a serem verificadas em uma planta de briquetagem a nível industrial. São equipamentos de construção razoavelmente simples, mas que, dentro de suas limitações, proporcionaram bons resultados a nível de qualidade dos briquetes produzidos e confiabilidade na caracterização dos mesmos. Tanto o *Sistema de Briquetagem a Quente* como o *Sistema de Pirólise com Taxas de Aquecimento Controladas e Atmosfera Inerte* possuem boa versatilidade de utilização, ou seja, é possível variar-se os parâmetros de temperaturas, pressões e taxas de aquecimento em largas faixas.

Em uma instalação industrial, os equipamentos selecionados (extrusoras, prensas, pirolisadores,...) devem operar com parâmetros próximos aos determinados nos ensaios, parâmetros esses, que em geral, são utilizáveis para a maioria dos resíduos de biomassa. Ressalta-se também que são necessários outros equipamentos como correias transportadoras, secadores no caso de utilização de resíduos com alta densidade, sistemas de suprimento do resíduo e carregamento dos briquetes, embaladores, pátio para armazenamento dos insumos e produtos.

VI.b. Preparação e Caracterização dos Briquetes Produzidos.

Nos ensaios de briquetagem, foram utilizados resíduos de grande importância para a realidade brasileira que são os derivados da indústria da cana-de-açúcar e do processamento da madeira. Procurou-se controlar os parâmetros de briquetagem a quente e compactação com a utilização de ligantes, onde dos muitos ensaios realizados, foram selecionados os que proporcionaram melhores características mecânicas aos briquetes. Pode-se dizer que os resultados foram satisfatórios no sentido em que se conseguiu determinar os melhores parâmetros a serem utilizados em uma instalação industrial.

Deve-se em uma próxima etapa, utilizar outros tipos de ensaios de caracterização dos briquetes e que não foram possíveis de serem realizados neste trabalho, visando-se analisar os produtos obtidos de modo mais completo. Como exemplo, pode-se citar ensaios de resistência à tração e compressão, resistência a quente, dureza, densidade verdadeira, análise elementar e poder calorífico inferior. Outros passos a serem realizados são a utilização de novos resíduos, podendo-se misturar materiais diferentes e o estudo do projeto e construção de um modelo protótipo que forneça uma produção diária de briquetes, possibilitando dessa forma, analisar um sistema que apresenta características similares a uma planta industrial, só que a nível de protótipo.

VI.c. Análise Técnica-Econômica-Ambiental.

O briquete, de uma forma geral, tem se mostrado em diversas localidades como uma forma racional de utilização eficiente de finos de carvão e biomassa. Os resíduos agroflorestais começam a serem vistos como uma fonte de energia passível de aproveitamento e não mais como um material indesejado no processo. No Brasil, parte-se do princípio que não se pode mais explorar indiscriminadamente matas nativas e que novas alternativas como o reflorestamento em áreas atualmente não utilizadas e o uso energético dos resíduos devem ser tratados com maior atenção. A palha de cana no estado de São Paulo e a serragem em estados do sul e do norte do país são insumos que atualmente apresentam grandes potenciais para geração energética nessas localidades, onde a sua utilização na produção de novos combustíveis viria a contribuir na geração de novos empregos em indústrias produtoras de briquetes nessas regiões do país.

Ao se projetar uma instalação industrial de briquetes de resíduos, deve-se tentar ao máximo minimizar os custos, buscando baratear o produto. Em geral, os custos totais de produção devem ser semelhantes aos preços de combustíveis competitivos no mercado energético (p. ex. lenha e carvões), embora em alguns mercados como o doméstico e o comercial, um preço maior dos briquetes ainda se torne viável, devido a fatores compensatórios como a regularidade no fornecimento, menor umidade, maior poder calorífico e propriedades e formato geométrico uniformes.

A utilização de briquetes de resíduos pode também ser feita em substituição a combustíveis fósseis em regiões com níveis de poluição do ar elevados. Por ser um combustível renovável proporciona um ciclo fechado de CO₂ e libera menores quantidades de SO₂ e NO₂, responsáveis pela "chuva ácida".

E finalmente a isenção de impostos e facilidades de financiamentos buscando incentivar alguns produtores de briquetes seriam atitudes louváveis por parte do governo, já que a produção de combustíveis sólidos a partir de resíduos apresenta inúmeras vantagens sócio-econômicas e ambientais para o país.

VII. Referências Bibliográficas.

- [1]. Martins, H., "Madeira como Fonte de Energia", in "Uso da Madeira para Fins Energéticos", **Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC**, Vol. I, pp. 9-26, Belo Horizonte, 1980.
- [2]. **Ministério da Infra-Estrutura**, "Balanço Energético Nacional", Brasília, 1992.
- [3]. **Agência para Aplicação de Energia - CESP**, "Relatório de Séries Históricas", Edições 1988 - 1993, São Paulo, out. 1993.
- [4]. **Ministério da Agricultura**, "Proposta de Utilização Energética de Florestas Resíduos Agrícolas", Coordenadoria de Agroenergia - CAERG, Vol. I, Brasília, 1984.
- [5]. **Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, "Anuário Estatístico do Brasil 91", Vol. 51, Rio de Janeiro, 1991.
- [6]. Macedo, I. C., "Potencial da Biomassa da Cana como Matéria-Prima em São Paulo", **Publicação COPERSUCAR**, pp. 1-6, Piracicaba, agosto 1991.
- [7]. Hugot, E., "Manual da Engenharia Açucareira", **Editora Mestre Jou**, Vol. II, São Paulo, 1977.

- [8]. PETROBRÁS - Depto. Industrial - Divisão de Fontes Energéticas Alternativas, "Dados Técnicos de Biomassas", N° 29, p. 65, Rio de Janeiro, 1982.
- [9]. Oliva R, E.; Dominguez T., P. D., "Tecnología para Utilizar la Paja de Caña como Combustible en los Centrales Azucareros", Revista de la Asociación de Tecnicos Azucareros de Cuba - ATAC, Vol. I, pp. 36-39, Havana, Cuba, janeiro 1990.
- [10]. Dombrowsky, L. T. D., "Gramíneas no Paraná", Fundação Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, bol. n° 28, pp. 5-7, Londrina, dezembro 1989.
- [11]. Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, "Babaçu, Fontes Energéticas Brasileiras - Inventário/Tecnologia", Vol. I, Belo Horizonte, 1987.
- [12]. Brito, J. O., "Uso Energético da Madeira", Curso de Engenharia Florestal, ESALQ-USP, Piracicaba. (Apostila utilizada em palestra proferida no Laboratório de Combustíveis Alternativos - LCA, UNICAMP, setembro 1989).
- [13]. Freire, W. J., "Aproveitamento de Resíduos Vegetais", Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas (Apostila utilizada em palestra proferida na Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, agosto 1992).

- [14]. Grover, P. D., "Thermochemical Characterisation of Biomass Residues for Gasification", **Centre for Energy Studies - Indian Institute of Technology**, Vol I., pp. 29-44, Delhi, Índia, 1986.
- [15]. Molle, J. F., "Pyrolysis Technology and Products", Anais do "Workshop on Pyrolysis as a Basic Technology for Large Agro-Energy Projects", **Publicação Comission of the European Comunities**, vol I., pp. 65-68, La'Áquila, Itália, outubro 1987.
- [16]. Juvillar, J. B., "Tecnologia de Transformação de Madeira em Carvão", in "Uso da Madeira para Fins Energéticos", **Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC**, Vol. I, pp. 67-82, Belo Horizonte, 1980.
- [17]. Bhattacharya, S. C., "Carbonized and Uncarbonized Briquettes from Residues", Anais do "Workshop on Biomass Thermal Processing", **Publicação SHELL**, Vol. I, pp. 1-9, Londres, Inglaterra, outubro 1990.
- [18]. Kallschever, H. A.; Duarte, L. A., "Gaseificação Industrial", in "Produção e Utilização de Carvão Vegetal", **Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC**, Vol I., pp. 253-260, Belo Horizonte, 1982.
- [19]. Assumpção, R. M. V.. "Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal. Princípios e Aplicações", in "Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal", **Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC**, Vol. I, pp. 53-72, Belo Horizonte, 1981.

- [20]. Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF, "Cana-de Açúcar, Fontes Energéticas Brasileiras - Inventário/Tecnologia", Vol. II, IV e VI, Belo Horizonte, 1987.
- [21]. Rossi, S.J., "Ar Natural e Bomba de Calor na Secagem e Armazenamento de Sementes de Soja", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, pp. 70-75, Campinas, 1980.
- [22]. Peres, E. S., "Resíduos Urbanos e a Produção de Biogás", Instituto de Física, UNICAMP, pp. 42-52, Campinas (Apostila utilizada em palestra proferida na Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, abril 1992).
- [23]. Kling, S. H., "Etanol a Partir de Madeira" in "Uso da Madeira para Fins Energéticos", Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Vol. I, pp. 83-100, Belo Horizonte, 1980.
- [24]. Mitre, M.N., "Caldeiras para a Queima de Madeira e Bagaço", in "Produção e Utilização de Carvão Vegetal", Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Vol I., pp. 319-348, Belo Horizonte, 1982.
- [25]. Bajay, S. V., et alii, "Competitividade e Impacto da Usina Termelétrica a Resíduos Ultraviscosos de Petróleo em Paulínia", Núcleo de Energia da UNICAMP, Vol I., pp. 3.39-3.41, Campinas, novembro 1991.

- [26]. Revista São Paulo Energia, "Pequenas Termelétricas a Biomassa, um Mercado Importante", Publicação CPFL, nº 7, p. 23, São Paulo, agosto 1984.
- [27]. Macedo, I. C., "Perspectivas da Co-Geração nas Usinas de Açúcar e Álcool", anais "I Simpósio Brasileiro sobre Co-Geração de Energia na Indústria", UNICAMP, Vol. I, pp. 101-108, Campinas, fevereiro 1989.
- [28]. Jornal "A Gazeta Mercantil", "Usinas Ganham com o Bagaço", pg. 5, São Paulo, 26 de junho de 1992.
- [29]. Antunes, R.C., "Briquetagem de Carvão Vegetal" in "Produção e Utilização de Carvão Vegetal", Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Vol I., pp. 197-206, Belo Horizonte, 1982.
- [30]. Moro, J. P., "Briquetagem de Finos de Carvão Vegetal", Anais da "2ª Jornada de Engenharia dos Países de Língua Oficial Portuguesa", Publicação PETROBRÁS, Vol. I, pp. 1-14, Rio de Janeiro, 1987.
- [31]. Kural, O., "Briquetting of Coal", Istambul Technical University-Mining Faculty, Vol. I, pp. 1-16, Istambul, Turquia, 1992.
- [32]. Bezzon, G., Luengo, C. A., "Briquetagem de Resíduos Agroflorestais Através de Tratamento a Altas Pressões e Temperaturas", Anais da "1era. Conferencia Iberoamericana de Ingeniería Mecánica", Vol I., Publicação Instituto Superior Politécnico Julio Antonio Mella - ISPJAM, Santiago de Cuba, Cuba, Julho 1993.

- [33]. ASTM - American Society for Testing Materials, Norma D 1762-64, "Standards Methods for Chemical Analysis of Charcoal", part. 16, pp. 641-643, Filadélfia, EUA, 1969.
- [34]. Ciampi, G. J. S., "Desenvolvimento de um Calorímetro para a Determinação do Conteúdo Energético de Combustíveis Sólidos", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, pp. 14-83, Campinas, 1992.
- [35]. ASTM - American Society for Testing Materials, Norma D 3286, "Standards Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Isoperibol Bomb Calorimeter", Filadélfia, EUA, 1985.
- [36]. Rocha, J. D., "Potencial dos Sub-Produtos de Coque para Siderurgia", Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, pp. 50-60, Campinas, 1993.
- [37]. Coutinho, A. R., Rocha, J. D., Luengo, C. A., "Obtenção e Caracterização de Piche de Biomassa", Anais do II Encontro de Carboquímica, Publicação da Associação Brasileira dos Metais, pp. 89-95, Salvador, 1989.
- [38]. Gomes, P. A., Oliveira, J. B., "Teoria da Carbonização da Madeira", in "Uso da Madeira para Fins Energéticos", Publicação Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, Vol. I., pp. 27-42, Belo Horizonte, 1980.

- [39]. Silva Lora, E.; Beatón Soler, P., "Pelletización del Bagazo", in "Características Técnicas y Clasificación de Bagazo de Caña", Publicação "Instituto Superior Politécnico Julio A. Mella - ISPJAM", Santiago de Cuba, Cuba, 1986.
- [40]. METALBOR, "Extrusoras para Termoplásticos", Catálogo Comercial, São Bernardo do Campo, 1992.
- [41]. FRAMATOME, "The P1000 Pyroliser", Catálogo Comercial, Paris, França, 1987.
- [42]. Cia de Aços Especiais Itabira S.A. - ACESITA, "Modernização da Produção de Carvão Vegetal", Gerência de Desenvolvimento Tecnológico, pp. 1-9., Belo Horizonte, junho de 1991.
- [43]. Bhattacharya, S. C., et alii, "A Survey of Uncarbonized Briquettes and Biocoal Markets in Thailand", Reric International Energy Journal, Vol. 11, n° 1 pp. 17-28, Junho 1989.
- [44]. Hood, A. H. M., "Charcoal Briquettes Production from Cotton Stalks for Use as Domestic Fuel in Sudan", Anais do "Workshop on Biomass Thermal Processing", Publicação SHELL, Vol. I, Londres, Inglaterra, outubro 1990.

Empresas Consultadas:

{1}. **Associação Brasileira de Carvão Vegetal, ABRACAVE**, Belo Horizonte, 2 de setembro de 1993.

{2}. **Companhia Siderúrgica Belgo Mineira**, Belo Horizonte, 2 de setembro de 1993.

{3}. **Manesmann S. A.**, Belo Horizonte, 2 de setembro de 1993.

{4}. **CPFL**, Campinas, 2 de setembro de 1993.