

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA  
UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL SÓLIDO**

**WALBERT CHRISOSTOMO**

**Sorocaba**

**2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA  
UTILIZAÇÃO COMO COMBUSTÍVEL SÓLIDO**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência dos Materiais como  
requisito para obtenção do título de  
Mestre em Ciência dos Materiais.

Autor: Walbert Chrisostomo

Orientador: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji

Co-orientador: Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro

Sorocaba

2011



Chrisostomo, Walbert

C554e Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido / Walbert Chrisostomo. -- Sorocaba, 2011

67 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, *Campus Sorocaba*, 2011

Orientador: Fábio Minoru Yamaji

Banca examinadora: Antonio José Félix de Carvalho, José Cláudio Caraschi

Bibliografia

1.Resíduos agroindustriais. 2.Biomassa. 3.Energia. I. Título. II. Sorocaba - Universidade Federal de São Carlos.

CDD 662.88

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



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

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



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

Aos oito dias do mês de fevereiro de 2011, às 10:00h no Laboratório de Física da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, reuni-se a Comissão Examinadora composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji, da Universidade Federal de São Carlos/*campus* Sorocaba, Prof. Dr. Antonio José Felix de Carvalho, da Universidade de São Paulo/*campus* São Carlos, Prof. Dr. José Cláudio Caraschi, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/*campus* Itapeva, sob a presidência do primeiro, para a Defesa de Dissertação de **WALBERT CHRISOSTOMO**, de acordo com o regulamento do Programa, tendo o(a) candidato(a) recebido o conceito final: *Aprovado*. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FÁBIO MINORU YAMAJI

Prof. Dr. ANTONIO JOSÉ FELIX DE CARVALHO

Prof. Dr. JOSÉ CLÁUDIO CARASCHI





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS  
MATERIAIS - PPGCM  
Rodovia João Leme dos Santos, km 110, Bairro Itinga  
Telefone: (15) 3229-6000  
CEP 18052-780 - Sorocaba - São Paulo – Brasil  
ppgcm@ufscar.br / www.ppgcm.ufscar.br



Pós-Graduação UFSCar  
multiplicando conhecimento

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - *campus* Sorocaba  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

ADENDO Nº 001/11 REFERENTE À ATA GERAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO DO DISCENTE WALBERT CHRISOSTOMO REALIZADA EM 08/02/2011.

O Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais - PPGCM, no uso de suas atribuições legais, torna público as alterações ocorridas na Ata Geral de Defesa de Dissertação de Mestrado do discente Walbert Chrisostomo. Na forma deste adendo, para conhecimento dos interessados, **foi incluído o título da Dissertação: “Estudo da Compactação de Resíduos Lignocelulósicos para Utilização como Combustível Sólido”.**

Sorocaba, 25 de fevereiro de 2011.

*Antonio Riul Jr*  
**Prof. Dr. Antonio Riul Junior**  
COORDENADOR DO PPGCM

Prof. Dr. Antonio Riul Junior  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em “Ciência dos Materiais” - PPGCM







***“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar; É melhor tentar, ainda que em vão que sentar-se, fazendo nada até o final”.***

***Martin Luther King***



***Dedico este trabalho aos meus pais  
Amaury (Véio) e Ilza e às minhas irmãs,  
que sempre me ajudaram e incentivaram.***



## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji, pela oportunidade, confiança, atenção, amizade e apoio para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro, pela contribuição, sugestões, atenção e amizade.

Aos Professores Dr. Antonio Riul Jr., coordenador e Dr. Antonio José Félix de Carvalho ex-coordenador do PPGCM / UFSCar, Campus Sorocaba/SP, pelo apoio nos momentos necessários, atenção e pela amizade.

Aos Professores Dr. Aparecido Júnior de Menezes e Dr. Fábio de Lima Leite, pelas oportunidades oferecidas, sugestões e amizade.

Aos professores do PPGCM / UFSCar, Campus Sorocaba/SP, sempre presentes, pela orientação e dedicação ao ensino e à pesquisa.

Aos técnicos de laboratório: Isis, João Lúcio e Mônica, pela ajuda nos momentos necessários, amizade e boa convivência.

Ao Mestrando André Juliano Franco e a empresa Unimetal Indústria, Comércio e Empreendimentos, pela realização das análises de Poder Calorífico dos briquetes e pela sua amizade.

Aos colegas do Mestrado, Doutorado e do laboratório de pesquisa, pela amizade e boa convivência.

Aos colegas do grupo de pesquisa Biomassa e Bioenergia e da Iniciação Científica, pelos trabalhos realizados e pela amizade.

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

À CAPES, pela bolsa concedida e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMO</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>vii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>3</b>
2.1 Biomassa vegetal para energia	3
2.2 Resíduos lignocelulósicos	4
2.3 Utilização de resíduos lignocelulósicos para energia	10
2.4 Compactação de resíduos lignocelulósicos (briquetagem)	11
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>15</b>
3.1. Materiais	15
3.2. Caracterização dos resíduos lignocelulósicos	16
3.2.1. Classificação do tamanho das partículas (granulometria)	16
3.2.2. Densidade a granel	18
3.2.3. Análise imediata	19
3.2.3.1. Teor de umidade	19
3.2.3.2. Teor de voláteis	20
3.2.3.3. Teor de cinzas	21
3.2.3.4. Teor de carbono fixo	21
3.2.4. Teor de extrativos	22
3.2.4.1. Teor de extrativos solúveis em água	22
3.2.4.2. Teor de extrativos solúveis em ciclohexano/etanol	23
3.2.5. Teor de lignina Klason insolúvel	24
3.3. Preparação dos resíduos para a compactação	25

3.4	Compactação dos resíduos lignocelulósicos	26
3.5	Caracterização dos briquetes	27
3.5.1	Densidade aparente	28
3.5.2	Expansão longitudinal	28
3.5.3	Resistência à tração por compressão diametral	29
3.5.4	Absorção de umidade	30
3.5.5	Poder calorífico superior (PCS)	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>32</b>
4.1	Resultados da caracterização dos resíduos	32
4.1.1	Tamanho das partículas (granulometria)	32
4.1.2	Densidade a granel	34
4.1.3	Análise imediata	35
4.1.4	Teor de extrativos	36
4.1.5	Teor de lignina Klason insolúvel	37
4.2	Características dos resíduos prontos para a compactação	38
4.3	Resultados da caracterização dos briquetes	39
4.3.1	Densidade aparente	40
4.3.2	Expansão longitudinal	42
4.3.3	Resistência à tração por compressão diametral	44
4.3.4	Absorção de umidade	46
4.3.5	Poder calorífico superior (PCS)	47
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>52</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Unidade de celobiose.	5
<b>Figura 2</b> – Fórmulas estruturais dos açúcares constituintes das hemiceluloses (FENGEL; WEGENER, 1989).	7
<b>Figura 3</b> – Estrutura da lignina proposta por Nimz em 1974 (FENGEL; WEGENER, 1989).	8
<b>Figura 4</b> – Associação dos componentes da parede celular vegetal, adaptado (FENGEL; WEGENER, 1989).	9
<b>Figura 5</b> – Resíduos coletados para caracterização. B.C. – bagaço de Cana-de-açúcar; S.E. serragem de <i>Eucalyptus sp</i> e S.P. serragem de <i>Pinus sp</i> .	16
<b>Figura 6</b> – Conjunto de peneiras e agitador orbital com batidas no topo.	17
<b>Figura 7</b> – Resíduos prontos para a compactação.	25
<b>Figura 8</b> – Balança determinadora de umidade.	26
<b>Figura 9</b> – Equipamentos utilizados na compactação dos resíduos. a) Molde e acessórios; b) Prensa hidráulica.	27
<b>Figura 10</b> – Medida da expansão longitudinal dos briquetes.	28
<b>Figura 11</b> – Ensaio de tração por compressão diametral. a) Máquina no momento do ensaio; b) Representação do corpo-de-prova durante o ensaio.	30
<b>Figura 12</b> – Distribuição granulométrica dos resíduos.	34

<b>Figura 13</b> – Briquetes produzidos a partir da compactação dos resíduos. a) seção longitudinal; b) seção transversal.	41
<b>Figura 14</b> – Expansão longitudinal média dos briquetes dos resíduos.	44
<b>Figura 15</b> – Briquetes após ensaio de tração por compressão diametral.	45
<b>Figura 16</b> – Gráfico tensão x deformação média dos briquetes.	46
<b>Figura 17</b> – Gráfico da absorção de umidade em função do tempo.	47
<b>Figura 18</b> – Briquetes após ensaio de absorção de umidade.	48

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> - Especificações das peneiras utilizadas na análise granulométrica dos resíduos.	18
<b>Tabela 2</b> - Análise granulométrica dos resíduos.	34
<b>Tabela 3</b> - Massa específica a granel dos resíduos.	35
<b>Tabela 4</b> - Análise imediata dos resíduos.	36
<b>Tabela 5</b> - Teor de extrativos dos resíduos.	38
<b>Tabela 6</b> - Teor de lignina Klason insolúvel dos resíduos.	38
<b>Tabela 7</b> - Características dos resíduos preparados para a compactação.	40
<b>Tabela 8</b> - Massa específica aparente média dos briquetes.	42
<b>Tabela 9</b> - Expansão longitudinal média dos briquetes após 72 horas da compactação.	43
<b>Tabela 10</b> - Resistência dos briquetes no ensaio de tração por compressão diametral.	45
<b>Tabela 11</b> - Poder calorífico superior (PCS) dos briquetes.	48



## RESUMO

CHRISOSTOMO, W. *Estudo da Compactação de Resíduos Lignocelulósicos Para Utilização Como Combustível Sólido*. 2011. 56p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos – Campus Sorocaba.

A produção de energia a partir da queima de materiais lignocelulósicos constitui uma interessante forma de aproveitamento de resíduos. Dois fatores que dificultam a utilização desses resíduos como combustível são a baixa densidade e o alto teor de umidade. A compactação de resíduos lignocelulósicos pode ser uma forma de produção de combustível sólido de melhor qualidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade de combustíveis sólidos (briquetes), produzidos a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos gerados em processos agroindustriais. Os materiais utilizados neste trabalho foram: bagaço de cana-de-açúcar, serragem de *Eucalyptus sp* e serragem de *Pinus sp*. Os resíduos foram compactados nas mesmas condições de tamanho de partículas (granulometria de 20 a 40 mesh) e teor de umidade (10% base seca). A compactação foi realizada em uma prensa hidráulica, sem aquecimento. A pressão de compactação utilizada foi de  $1250 \text{ kgf.cm}^{-2}$  e o tempo de aplicação da carga máxima de 15 segundos. A produção dos briquetes foi possível com os três tipos de materiais utilizados. Os briquetes produzidos apresentaram densidades que variaram entre 840 e  $872 \text{ kg.m}^{-3}$ . Isso representou uma redução de volume de 12,2 vezes para o bagaço de cana, 6,01 vezes para eucalipto e 5,28 vezes para o pinus. A expansão longitudinal dos briquetes foi de 9,44% para o eucalipto, 9,61% para a cana e 10,76% para o pinus. Os resultados dos ensaios de tração diametral foram de 1,01MPa (eucalipto), 0,61MPa (cana) e 0,45MPa (pinus). O poder calorífico superior (PCS) encontrado foi de  $4675 \text{ kcal.kg}^{-1}$  (pinus),  $4436 \text{ kcal.kg}^{-1}$  (eucalipto) e  $4138 \text{ kcal.kg}^{-1}$  (cana). Os resultados mostraram que todos os materiais analisados podem ser utilizados na produção de briquetes e que a produção dos briquetes foi possível através da compactação sem aquecimento. O processo de compactação melhorou a qualidade do biocombustível sólido.



## ABSTRACT

CHRISOSTOMO, W. *Study of Compaction Lignocellulosic Waste to Use as Solid Fuel*. 2011. 56p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos – *Campus Sorocaba*.

The production of energy from the combustion of lignocellulosic materials is an interesting way to waste recovery. Two main factors hampering the use of these residues as fuel are the low density and the high moisture content. Compression of lignocellulosic residues can be a way of producing solid fuel of better quality. The aim of this study was to evaluate the quality of solid fuels (briquettes) produced from the compaction of waste generated in lignocellulosic agroindustrial processes. The materials used in this study were: sugar cane bagasse, sawdust of *Eucalyptus* sp and sawdust of *Pinus* sp. The residues were compressed under the same conditions of particle size (particle size ranging from 20 to 40 mesh) and moisture content (10% dry basis). The compression was performed in a hydraulic press, without heating. The compaction pressure used was  $1250 \text{ kgf.cm}^{-2}$  and the time of application of the maximum load was 15 seconds. The production of briquettes was possible with the three types of materials used. The briquettes produced had densities ranging between 840 and 872  $\text{kg.m}^{-3}$ . This represented a volume decrease of 12.2 times for the sugar cane bagasse, 6.01 times for the eucalyptus and 5.28 times for the pine. The longitudinal expansion of the briquettes was 9.44% for the eucalyptus, 9.61% for the sugarcane and 10.76% for the pine. The results of diametral compression test were 1.01 MPa (eucalyptus), 0.61 MPa (cane) and 0.45 MPa (pine). The higher heating values (HHV) found were 4675  $\text{kcal.kg}^{-1}$  (pine), 4436  $\text{kcal.kg}^{-1}$  (eucalyptus) and 4138  $\text{kcal.kg}^{-1}$  (cane). The results showed that all the materials tested can be used in the production of briquettes and the production of briquettes was possible by compression without heating. The compacting process improved the quality of solid biofuel.





## **1. Introdução**

O estudo de fontes alternativas e sustentáveis de energia tornou-se, nos últimos anos uma área de pesquisa de grande importância. Dentro desse contexto, a utilização de biomassa para a geração de energia é vista como uma das alternativas à substituição dos combustíveis de origem fóssil. Um dos principais desafios nessa área é encontrar soluções para a utilização da biomassa de forma eficiente.

O estudo, desenvolvimento e utilização de biomassa, para a geração de energia, podem apresentar grandes benefícios em termos de qualidade de energia, impactos na saúde humana e no meio ambiente. A biomassa pode ser convertida em combustíveis gasosos, líquidos e sólidos.

O aproveitamento térmico da biomassa vegetal é uma forma relativamente barata e tecnologicamente viável de produzir energia, principalmente no que se relaciona à utilização de resíduos gerados a partir de processos agroindustriais, como por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar, gerado pelas usinas, na produção de açúcar e etanol e os resíduos da madeira, gerados na colheita e no processamento da mesma. Nos próximos anos é de esperar um aproveitamento crescente destes resíduos como combustíveis para a geração de energia, através da combustão em pequenas centrais termoelétricas, dedicadas à queima de biomassa.

O que dificulta a utilização desses resíduos gerados a partir de processos agroindustriais para a geração de energia são as propriedades e as condições em que estão disponíveis: baixa densidade, alta umidade, tamanho

e formato geométrico indesejado. Para aumentar a eficiência energética desses resíduos e facilitar o seu transporte e armazenamento é necessário corrigir algumas dessas propriedades através de processos industriais.

A compactação é uma boa alternativa para a utilização desses resíduos como combustível sólido, na forma de *pellets* e briquetes. O processo de compactação consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido compacto de alta densidade. Qualquer tipo de resíduo lignocelulósico pode ser compactado, desde que esteja nas condições adequadas exigidos pelo processo de compactação.

Nos últimos anos, o interesse pela compactação da biomassa para a utilização como combustível sólido aumentou muito. Entretanto, o processo de compactação é uma tecnologia antiga.

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a compactação de diferentes resíduos lignocelulósicos, gerados a partir de processos agroindustriais e avaliar a qualidade dos briquetes produzidos para a utilização como combustível sólido.

## **2. Revisão da Literatura**

### **2.1 Biomassa para energia**

Segundo Omachi et al.(2004) a biomassa vegetal é todo material orgânico, de origem não fóssil que possua energia química, isso inclui todos os tipos de vegetais, ou seja, é toda matéria orgânica de origem vegetal que pode ser utilizada na geração de energia. A biomassa é um importante recurso energético renovável utilizado na geração de energia elétrica e outras formas de uso, com baixa emissão de poluentes (LI; LIU, 2000).

A biomassa vegetal é considerada fonte renovável de energia, entretanto nem sempre é utilizada de forma sustentável. A questão da sustentabilidade da biomassa é de especial importância nos países em desenvolvimento, onde a biomassa tradicional é a fonte de energia mais utilizada para cocção e aquecimento de ambientes. As chamadas “biomassas tradicionais” são aquelas não sustentáveis, utilizadas de maneira rústica, em geral para aquecimento de ambientes em comunidades isoladas, como por exemplo, a lenha e o carvão obtidos a partir de florestas nativas. São consideradas “biomassas modernas” os biocombustíveis (etanol e biodiesel), madeira de reflorestamento, bagaço de cana-de-açúcar e outras fontes utilizadas de maneira sustentável e eficiente (KAREKESI; COELHO; LATA, 2004).

A biomassa tem sido empregada de forma crescente no mundo como insumo energético. A combustão é a tecnologia mais utilizada na produção de calor, podendo ainda estar associada diretamente à produção de energia elétrica, através da utilização de caldeiras e turbinas. A combustão de

biomassa associada aos resíduos agroflorestais e agroindustriais, constitui atualmente a tecnologia de conversão de biomassa mais utilizada no mundo (OVEREND, 2003). Essa tecnologia é responsável por 97 % da produção bioenergética mundial (DEMIRBAS, 2004).

A biomassa é o quarto recurso energético mais utilizado, fornecendo através da sua combustão aproximadamente 14 % das necessidades energéticas mundiais. Em alguns países em desenvolvimento, a biomassa chega a ser a mais importante fonte de energia (DEMIRBAS, 2004).

## **2.2 Resíduos lignocelulósicos**

Resíduo pode ser definido como todo material descartado nas atividades de um processo produtivo, podendo torna-se um risco para o meio ambiente. Entretanto, os resíduos podem deixar de ser um risco e passar a ser matéria-prima para diversos outros processos, reduzindo custos (VALE; GENTIL, 2008).

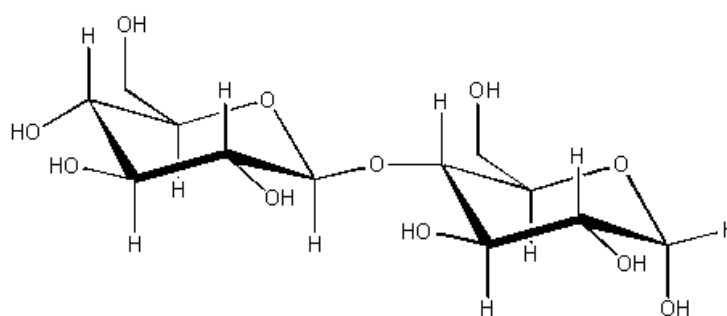
Segundo Eriksson e Prior (1990) os resíduos lignocelulósicos podem ser agrupados em três categorias principais:

- Resíduos agrícolas, gerados diretamente no campo durante a colheita da safra (por exemplo: a palha dos cereais);
- Resíduos florestais, gerados na exploração florestal (por exemplo: galhos, folhas, etc.);

- Resíduos agroindustriais, gerados no beneficiamento de grãos, gramíneas e madeira (por exemplo: casca de arroz, casca de café, bagaço de cana, serragem de madeira, etc.).

Os resíduos lignocelulósicos são assim chamados porque contêm na sua composição lignina e celulose sendo a maior parte de origem vegetal. Os materiais lignocelulósicos representam a fração mais expressiva da biomassa vegetal, a maior fonte de compostos orgânicos da biosfera. São constituídos por três frações principais que, juntas representam mais de 90% da massa seca total. São elas: celulose, hemiceluloses e lignina (PANDEY et al, 2000).

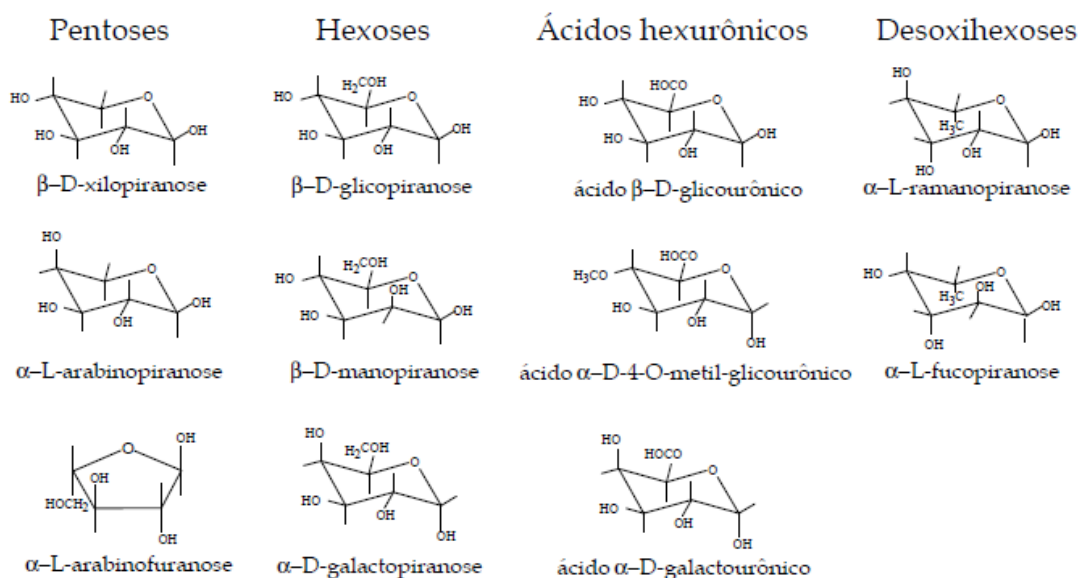
A celulose é um polímero de origem vegetal mais abundante da terra, sendo o componente orgânico principal das fibras naturais. A porcentagem de celulose nos vegetais varia de acordo com a origem. A celulose é constituída de cadeias lineares formadas por unidades de *celobiose* interligadas (Figura 1), formando um polímero de alta massa molar (FENGEL; WEGENER, 1989).



**Figura 1** - Unidade de celobiose.

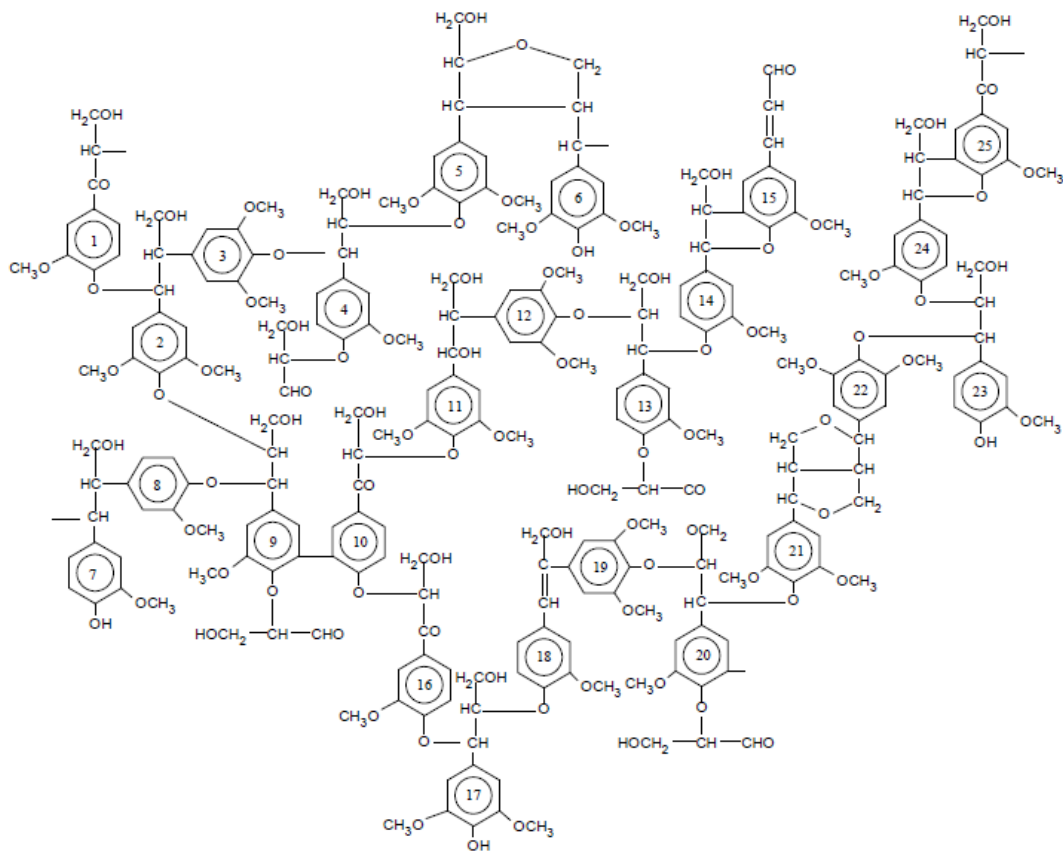
As cadeias de celulose nas paredes celulares dos vegetais são arranjadas compactamente, de modo que suas fibras apresentam regiões cristalinas, uma consequência do grande número de ligações de hidrogênio que resulta em uma forte interação entre suas moléculas (O'SULLIVAN, 1997, FENGEL; WEGENER, 1989).

As hemiceluloses, também chamadas de polioses, correspondem a polissacarídeos com grau de polimerização menor (da ordem de 10 a 100 vezes) com relação ao da celulose. As hemiceluloses diferem da celulose pela composição de várias unidades de açúcar, com cadeias moleculares menores e ramificadas. Os monossacarídeos que constituem as hemiceluloses podem ser divididos em quatro grupos principais, possuindo cada um propriedades características, são eles: as pentoses, as hexoses, os ácidos hexurônicos e as desoxihexoses (FENGEL; WEGENER, 1989). A Figura 2 apresenta as fórmulas estruturais desses açúcares.



**Figura 2** - Fórmulas estruturais dos açúcares constituintes das hemiceluloses  
(FENGEL; WEGENER, 1989).

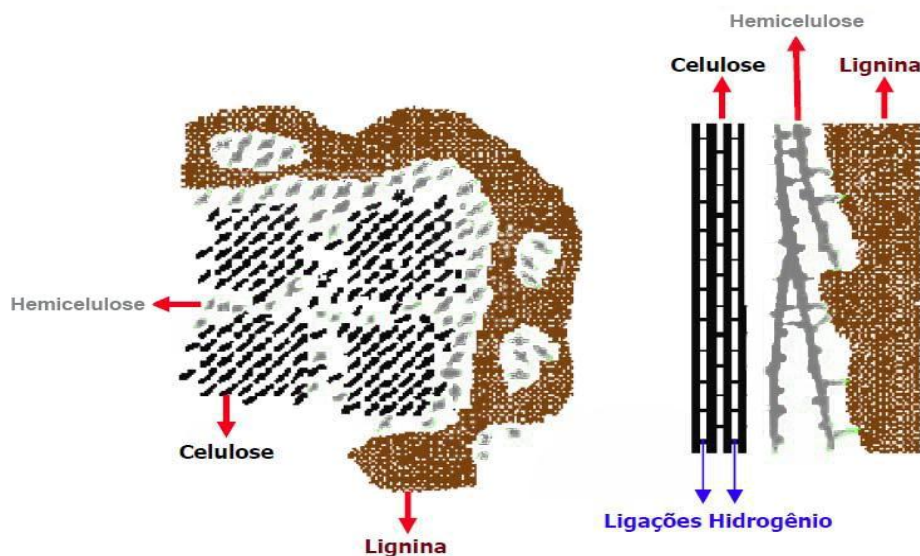
A lignina é uma macromolécula complexa, não cristalina, tendo em sua estrutura grupos aromáticos e alifáticos, com vários anéis fenilpropânicos substituídos, ligados através de diferentes tipos de ligações (Figura 3). Por possuir unidades diversificadas em sua estrutura, a lignina não deve ser considerada como uma substância única, mas como uma classe de materiais correlatos (FENGEL; WEGENER, 1989).



**Figura 3** - Estrutura da lignina proposta por Nimz em 1974 (FENGEL; WEGENER, 1989).

A lignina está concentrada nos espaços localizados entre as microfibras e nas regiões amorfas, entre cristais de celulose. Parte da compatibilização entre as cadeias hidrofílica de celulose e a matriz com grupos hidrofóbicos de lignina é feita pelas hemiceluloses. Esta associação entre celulose, hemicelulose e lignina dá origem a estrutura da parede celular das fibras lignocelulósicas (MALHERB, 2002).





**Figura 4** - Associação dos componentes da parede celular vegetal, adaptado (FENGEL; WEGENER, 1989).

Os componentes inorgânicos dos materiais lignocelulósicos, que são responsáveis pela formação de cinzas residuais no processo de combustão, são constituídos basicamente de cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), sódio (Na), ferro (Fe), silício (Si) e zinco (Zn) e seu conteúdo em massa é inferior a 1%, para a maioria desses materiais (JENKINS, 1990).

Os extrativos presentes nos materiais lignocelulósicos são compostos solúveis em solventes orgânicos e água. Estes compostos são constituídos por terpenos, resinas, ácidos graxos, ceras, taninos e carboidratos de baixa massa molar. O conteúdo de extrativos em materiais lignocelulósicos fica entre 2% a 6% em massa. (JENKINS, 1990).

### **2.3 Utilização de resíduos lignocelulósicos para a produção de energia**

Um resíduo lignocelulósico pode ser aproveitado como matéria-prima em um processo diferente daquele de origem, podendo ser utilizado como combustível na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em geradores ou termelétricas (QUIRINO, 2003).

Os resíduos da biomassa podem ser utilizados como combustíveis sólidos, para a produção de energia nas condições em que se encontram, sob controle de umidade; podem também ser transformados em partículas menores através de processos mecânicos, ou ainda, compactados na forma de briquetes e *pellets* (VALE; GENTIL, 2008).

O aproveitamento de recursos naturais como fontes de energia renováveis a partir de resíduos da biomassa, gera uma melhor posição no mercado de energia e contribui na redução de impactos ambientais provocados pela deposição inadequada desses resíduos no meio ambiente (VARELA et al. 1999).

De acordo com Srivastava et al.(1995), a utilização de resíduos lignocelulósicos (galhos, cascas, bagaço, serragem, etc.) como combustível representa uma interessante alternativa aos combustíveis sólidos tradicionais (lenha e carvão). O modo mais fácil e simples de utilizar o poder calorífico destes materiais é a combustão, entretanto, esta prática apresenta algumas desvantagens:

- Os resíduos vegetais possuem baixa densidade e muitos deles se encontram em forma de pó, provocando poeira e poluição, tornando difícil e caro o manuseio, o transporte, o armazenamento e seu uso como combustível.
- A maioria dos resíduos agrofloretais contém elevada umidade. Portanto, entre 18 e 20% do calor gerado na combustão é consumido para secar a própria biomassa, perdendo assim grande parte de seu potencial energético.

A heterogeneidade dos resíduos lignocelulósicos dificulta o seu controle de queima em aquecedores, caldeiras e fornos, e sua baixa massa específica aumenta o custo de transporte, dificulta o seu armazenamento e a sua utilização (LI; LIU, 2000).

#### **2.4 Compactação de resíduos lignocelulósicos (briquetagem)**

A compactação de resíduos de biomassa é um processo no qual, uma massa de pequenas partículas de materiais sólidos é prensada com o objetivo de formar blocos compactos de forma definida e de alta densidade. Por meio deste processo, resíduos de beneficiamento agroindustrial convertem-se em um material de maior valor comercial. Essa operação pode ocorrer com ou sem a presença de um aglutinante (ANTUNES, 1982).

A compactação da biomassa melhora, de forma significativa, a qualidade energética da matéria-prima. Ela é muito utilizada nos países industrializados,

onde as matérias-primas se constituem principalmente de sobras de madeira (WAMUKONYA; JENKINS, 1995).

Na compactação da biomassa podem-se obter dois produtos finais: o *pellet* e o briquete. O *pellet* é o resultado de um processo de compactação classificado como peletização, onde o produto final são pequenos cilindros de 6 a 10 mm de diâmetro, com 20 a 30 mm de comprimento. O briquete é o resultado de um processo de compactação de biomassa classificado como briquetagem, onde o produto final são cilindros e outras formas bem maiores que a do pelete (OBERNBERGER; THEK, 2004).

Bhattacharya et al. (1989) classificaram os processos de compactação de biomassa em duas categorias principais: compactação *quente em alta pressão* (CQ) e compactação *fria em baixa pressão* (CF). O primeiro tipo (CQ) é o mais importante em relação à variedade de matérias que pode processar e às características dos produtos obtidos, tanto que se tornou o mais comum e o termo compactação usualmente se refere implicitamente a este tipo de técnica. A conveniência de praticar a compactação em condições de elevada pressão consiste na obtenção de um produto com maior densidade e maior durabilidade, especialmente em relação ao manuseio e transporte.

Os equipamentos empregados na compactação podem ser classificados em quatro grupos:

- Prensas de pistão;
- Prensas de parafuso sem-fim;
- Prensas de rolo;
- Prensas peletizadoras.

Segundo Tabarés et al.(2000), as técnicas de compactação de resíduos lignocelulósicos é uma transformação física, que não afeta a composição química da matéria-prima.

Segundo Grover e Mishra (1996), existem vários mecanismos que permitem a ligação entre as partículas da biomassa compactada, e geralmente todos eles colaboram para obter a resistência e a coesão final do briquete. Os compostos ligantes que já estão presentes na matéria-prima podem ser ativados pelas elevadas pressões e temperaturas alcançadas no processo de compactação. Pode ser o caso da lignina, presente nas células da biomassa, que amolece entre 100 e 190 °C e age como uma cola entre as partículas. Os mecanismos de emaranhamento (entrelaçamento) entre as partículas e as interações químicas que ocorre pela forte aproximação e deformação das partículas provocada pelas pressões de compactação.

Os mesmos autores afirmam que existem diversos fatores a serem considerados antes de se qualificar um resíduo lignocelulósico para ser usado como matéria-prima de briquete, independentemente da sua disponibilidade em

grandes quantidades. Entre os fatores destacam-se o baixo teor de umidade e o baixo teor de cinza.

Segundo Bhattacharya (2004), as vantagens do processo de compactação de resíduos de biomassa são:

- Aumento do conteúdo calorífico do material por unidade de volume;
- O material compactado atinge rapidamente temperaturas altas, produzindo menos fumaça e fuligem, se comparado com a lenha;
- Produz uma queima uniforme e de qualidade;
- Maior facilidade dos processos de transporte e estocagem;

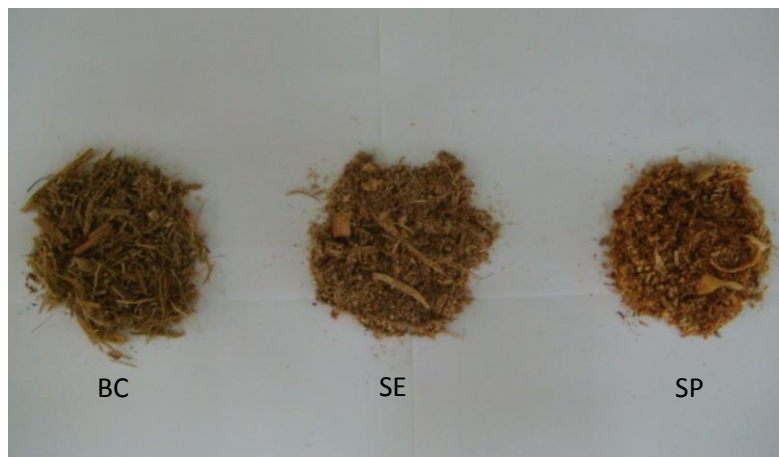
De acordo com Quirino e Brito (1991), o interesse pela aplicação do briquete no Brasil sempre esteve voltado para o aproveitamento de partículas finas de carvão da indústria siderúrgica, levando a maioria das pesquisas para o desenvolvimento de briquetes para uso neste setor industrial. No entanto, com o aumento do preço do petróleo e a escassez de lenha nativa em algumas regiões do país, as indústrias que utilizam destes combustíveis são forçadas a buscarem fontes alternativas de energia, podendo o briquete de resíduos lignocelulósicos ser uma opção viável.

### **3. Materiais e Métodos**

As análises e os ensaios deste trabalho foram realizadas nos Laboratórios de Processos Industriais e Pesquisa em Polímeros e Materiais Lignocelulósicos da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Campus Sorocaba/SP. A análise do poder calorífico superior (PCS) dos briquetes produzidos foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade da empresa Unimetal Indústria, Comércio e Empreendimentos.

#### **3.1 Materiais**

A escolha dos resíduos estudados foi feita com base na geração e disponibilidade dos mesmos na região do município de Sorocaba, no interior do estado de São Paulo. Foram estudados os seguintes resíduos: serragem de *Eucalyptus sp*, serragem de *Pinus sp* e bagaço de Cana-de-açúcar (Figura 5). As serragens de *Eucalyptus sp* e *Pinus sp* foram coletadas em uma empresa produtora de paletes e embalagens de madeira no município de Itapetininga/SP. O bagaço de cana-de-açúcar foi coletado em uma usina de açúcar e etanol, no município de Boituva/SP. Os resíduos coletados foram armazenados em sacos plásticos e foram lacrados para conservar suas condições físicas até o momento das análises.



**Figura 5** - Resíduos coletados para caracterização. BC – bagaço de Cana-de-açúcar; SE – serragem de *Eucalyptus sp* e SP – serragem de *Pinus sp*.

### 3.2 Caracterização dos resíduos lignocelulósicos

O conhecimento das propriedades físico-química de um material é essencial para poder avaliar o seu potencial como combustível. A caracterização dos resíduos estudados foi realizada nas condições em que estavam disponíveis na fonte geradora.

#### 3.2.1. Classificação do tamanho das partículas (Granulometria)

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação do tamanho das partículas do material. A classificação do tamanho das partículas é realizado pela separação do material em peneiras com malhas de aberturas diferentes em dispositivo vibratório. Para a determinação da granulometria dos resíduos coletados, os mesmos foram secos em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C. O ensaio foi realizado através de peneiramento mecânico, seguindo a

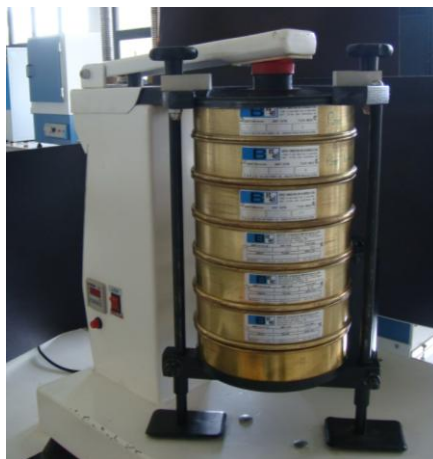


norma NBR 7217. Foram usadas 6 peneiras com abertura de malha progressiva, sendo a abertura maior de 5 mesh (4,0 mm) e a abertura menor de 100 mesh (0,15 mm). O conjunto de peneiras foi instalado em um agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes no topo, modelo MA 750, com sistema de agitação mecânico orbital com 250 rpm fixa. Foi utilizada uma amostra de 100 g de material no ensaio. A agitação mecânica das peneiras foi realizada por 10 minutos.

A porcentagem de resíduo retida nas peneiras é expressa por:

$$\%M = \frac{M_R}{M_T} \times 100 \quad (1)$$

Sendo:  $\%M$  é a porcentagem de resíduo retida em cada peneira;  $M_T$  é a massa total da amostra e  $M_R$  é a massa retida acumulada em cada peneira.



**Figura 6** - Conjunto de peneiras e agitador orbital com batidas no topo.

**Tabela 1** - Especificações das peneiras utilizadas na análise granulométrica dos resíduos.

<b>Tyler (Mesh)</b>	<b>Abertura (mm)</b>
5	4,00
10	2,00
20	0,84
40	0,42
60	0,25
100	0,15
Fundo	< 0,15

### 3.2.2. Densidade a granel

A densidade a granel dos resíduos foi determinada, utilizando a metodologia prescrita na norma NBR 6922. Foi utilizado um béquer de 2 litros de capacidade e de peso conhecido. A massa específica dos resíduos foi determinada nas condições em que estavam disponíveis na fonte geradora e após secagem em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C.

A massa específica a granel foi calculada conforme a Equação 2.

$$\gamma_g = \frac{m_a}{V_r} \quad (2)$$

Na qual:  $\gamma_g$  é a massa específica a granel, em  $\text{kg.m}^{-3}$ ;  $m_a$  é a massa da amostra no estado natural, em kg e  $V_r$  é o volume do recipiente, em  $\text{m}^3$ .

Essa é a massa específica que deve ser considerada para comparação com aquela dos resíduos compactados após briquetagem, pois é a massa específica na qual se encontram os resíduos.

### **3.2.3. Análise química imediata**

A análise química imediata de um combustível determina o teor de água do material (umidade), o teor de material que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), e também o teor de material residual após a combustão (cinzas). A análise imediata dos resíduos estudados foi realizada tendo como referência a norma NBR 8112.

#### **3.2.3.1. Teor de umidade**

A umidade dos resíduos estudados foi determinada nas condições em que foram coletados na fonte geradora. As amostras dos resíduos, contidas em béqueres, foram pesadas e secas em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C, com o posterior resfriamento em dessecador com sílica gel. Foram utilizadas amostras de 100 g de cada resíduo na análise. As amostras secas e resfriadas foram pesadas em uma balança analítica. O procedimento foi repetido até que não ocorressem variações de massa. A diferença de peso após secagem permitiu determinar o teor de umidade dos resíduos.

O teor de umidade (base seca) dos resíduos foram calculados de acordo com a Equação 3.

$$TU = \frac{M - M_1}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:  $TU$  é o teor de umidade, em %;  $M$  é a massa inicial da amostra úmida e  $M_1$  a massa seca, após secagem em estufa, ambas em gramas.

### 3.2.3.2. Teor de voláteis

Para a determinação de teor de voláteis os resíduos foram picados em um micro-moinho de facas tipo Wiley e secos em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C. Foi utilizado aproximadamente 1,0000 g de amostra isenta de umidade e com granulometria inferior a 40 mesh (0,42 mm). A amostra foi adicionada em um cadinho de porcelana com tampa e posicionada na porta do forno mufla previamente aquecida a ( $900 \pm 10$ ) °C, permanecendo nessa posição durante 3 minutos. Após este período, o cadinho foi colocado na mufla ( $900 \pm 10$ ) °C durante 7 minutos com a porta fechada. Após o aquecimento o cadinho foi esfriado em dessecador com sílica gel, até massa constante.

O teor de material volátil é determinado pela Equação 4.

$$MV = \frac{M_1 - M_2}{M} \times 100 \quad (4)$$

Na qual:  $MV$  é o teor de material volátil, em %;  $M_1$  é a massa inicial do cadinho mais a amostra;  $M_2$  é a massa final do cadinho mais a amostra e  $M$  é a massa da amostra seca.

### 3.2.3.3. Teor de cinzas

Para a análise de teor de cinzas os resíduos foram picados em um micro-moinho de facas tipo Wiley e secos em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C. Foi utilizado aproximadamente 1,0000g de amostra isenta de umidade e com granulometria inferior a 40 mesh (0,42 mm). A amostra foi adicionada em um cadinho de porcelana, previamente seco e tarado e levada a mufla ( $700 \pm 10$ ) °C por um período de 3 horas. Após a queima o cadinho foi esfriado em dessecador com sílica gel, até massa constante.

O teor de cinzas foi calculado com base na massa seca do resíduo, de acordo com a Equação 5.

$$CZ = \frac{m_1 - m_0}{m} \times 100 \quad (5)$$

Na qual: *CZ* é o teor de cinza, em %;  $m_0$  é a massa do cadinho;  $m_1$  a massa do cadinho mais o resíduo após combustão e  $m$  a massa da amostra seca a 0% de umidade, ambos em gramas.

### 3.2.3.4. Teor de carbono fixo

O percentual de carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido.

Segundo a norma NBR 8112, o teor de carbono fixo é calculado subtraindo-se de 100% a soma dos teores de materiais voláteis e de cinzas, conforme a Equação 6.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (6)$$

Sendo: *CF* teor de carbono fixo; *CZ* teor de cinzas e *MV* teor de voláteis, ambos em porcentagem.

### **3.2.4. Teor de extrativos**

Extrativos são compostos químicos que aparecem em pequenas quantidades na estrutura das paredes celulares dos materiais lignocelulósicos. São solúveis em água e em solventes orgânicos. Entre os extrativos, citam-se os terpenos, as resinas, os óleos voláteis, as graxas, as ceras e os taninos. Para a realização da análise, os resíduos foram picados em um micro-moinho de facas tipo Wiley e secos em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C.

#### *3.2.4.1. Teor de Extrativos solúveis em água quente*

O teor de extrativos solúveis em água foi determinado pela norma TAPPI T212 om-98. Em um béquer, com 1000 ml de água destilada, foi adicionada aproximadamente 5,0000g de amostra isenta de umidade e com granulometria inferior a 40 mesh (0,42 mm). O sistema foi submetido à agitação mecânica a  $70 \pm 5$ °C por 1h. Após este período de extração, a amostra foi filtrada e levada à estufa ( $105 \pm 2$ ) °C por um período de 3 horas, com o posterior resfriamento em dessecador com sílica gel e pesada em uma balança analítica. O procedimento foi repetido até que não ocorressem variações de massa.

O teor de extrativos solúveis em água a 70°C, %  $Ext_{H_2O}$ , foi calculado de acordo com a Equação 7.

$$\% Ext_{H_2O} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (7)$$

Sendo:  $m_1$  = massa (g) da amostra seca antes da extração e  $m_2$  = massa (g) da amostra seca, após a extração.

#### 3.2.4.2. Teor de Extrativos solúveis em cicloexano/etanol

O teor de extrativos solúveis em solventes orgânicos (cicloexano/etanol) foi determinado pela norma TAPPI T207 om-93. Foi utilizado aproximadamente 1,0000g de amostra isenta de umidade e com granulometria inferior a 40 mesh (0,42 mm), as quais foram submetidas a um processo de extração em sistema Soxhlet. Foi utilizada uma mistura extratora de etanol e cicloexano, na proporção de 1:1 (v/v). O período de extração foi de 48 horas. Em seguida, a amostra dos resíduos foi retirada do extrator e levada à estufa (105 ± 2) °C por um período de 3h. Com subsequente resfriamento até massa constante em dessecador com sílica gel.

O percentual de extrativos solúveis em etanol/cicloexano, %  $Ext_{C/E}$ , foi calculado de acordo com a Equação 8.

$$\% Ext_{C/E} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (8)$$

Na qual:  $m_1$  = massa (g) da amostra seca antes da extração e  $m_2$  = massa (g) da amostra seca após extração.

### **3.2.5. Teor de lignina Klason insolúvel**

O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado pelo método TAPPI T222 om-98. Foi utilizado aproximadamente 1,0000g de amostra livre de extrativos, isenta de umidade e com granulometria inferior a 40 mesh (0,42 mm). A amostra foi transferida para um almofariz com 15 ml de ácido sulfúrico 72%, sendo a mesma macerada cuidadosamente para se promover o máximo de desfibrilamento e deixada sob repouso por um período de 24h nesse meio ácido. Em seguida, a mistura foi transferida para um balão de 1L, sendo o volume ajustado para 560 ml com água destilada, e aquecida sob refluxo por 4 horas. A lignina insolúvel foi filtrada em um funil de vidro sinterizado nº4. A lignina, retida no funil de vidro sinterizado, foi seca em estufa ( $105 \pm 2$ ) °C por um período de 4 horas, sendo em seguida resfriada em dessecador com sílica gel e pesada em balança analítica até massa constante.

O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado de acordo com a Equação 9.

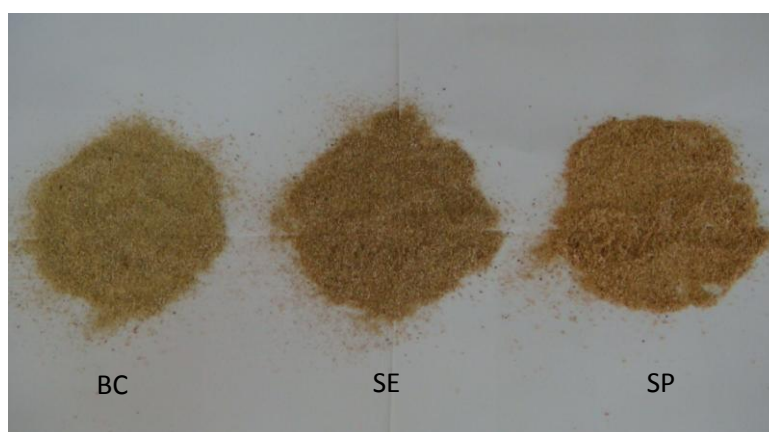
$$\%L.K.ins. = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (9)$$

Sendo:  $\%L.K.ins.$  = teor de lignina Klason insolúvel;  $m_1$  = massa de lignina Klason insolúvel seca em gramas e  $m_2$  = massa da amostra seca em gramas.



### 3.3. Preparação dos resíduos para a compactação

Os resíduos estudados foram compactados com as mesmas condições de tamanho de partículas e teor de umidade (Figura 7). Para isso os mesmos foram picados em um micro-moinho de facas tipo Wiley e separados em peneiras com abertura de malha progressiva. Foi selecionada para a compactação a fração que passou pela peneira de 20 mesh (0,84 mm) e que ficou retida na peneira de 40 mesh (0,42 mm). Os resíduos selecionados foram secos em estufa ( $105 \pm 2$ )°C até massa constante. A partir do material seco (aproximadamente 0% de umidade) foi calculada a quantidade de água necessária para atingir 10% de umidade (base seca) e adicionado aos resíduos. Após a adição de água os resíduos foram acondicionados em saquinhos plásticos.



**Figura 7** - Resíduos prontos para a compactação. BC – bagaço de cana; SE- serragem de eucalipto e SP – serragem de pinus.

Para confirmar o teor de umidade dos resíduos antes da compactação, os mesmos foram analisados em uma balança determinadora de umidade, da marca A&D Company, modelo MX – 50 (Figura8). O equipamento mede a porcentagem de perda de massa que é relativa ao teor de umidade (base seca) do resíduo. Na análise foram utilizados aproximadamente 1,0000 g de amostra de cada resíduo, sob aquecimento de 120 °C.



**Figura 8** - Balança determinadora de umidade.

### **3.4. Compactação dos resíduos lignocelulósicos**

A compactação dos resíduos e produção das amostras de briquetes foi realizada uma prensa hidráulica, modelo MA/098CP, com capacidade de 15 toneladas (Figura 9a). As amostras dos resíduos compactados foram produzidas em um molde cilíndrico de aço inoxidável, com diâmetro interno de 35 mm(Figura 9b). Foram utilizados 20,0 gramas de resíduo na compactação e produção de cada amostra.

A pressão utilizada no processo de compactação dos resíduos foi de  $1250 \text{ kgf.cm}^{-2}$ . O tempo de aplicação da pressão máxima utilizada foi de 15 segundos para a formação de cada amostra. O processo de compactação dos resíduos foi realizado sem o uso de aquecimento.



a)



b)

**Figura 9** – Equipamentos utilizados na compactação dos resíduos. a) Prensa hidráulica; b) Molde e acessórios.

### 3.5. Caracterização dos briquetes produzidos

A qualidade dos briquetes é avaliada por meio de suas propriedades, baseada em seu comportamento durante o seu transporte, armazenamento e utilização como combustível.

### **3.5.1. Densidade aparente**

A densidade aparente das amostras dos briquetes foram determinadas para calcular a razão de compactação dos resíduos. As amostras foram pesadas em uma balança analítica e medidas com um paquímetro digital, 72 horas após a compactação. A densidade aparente foi determinada através do quociente entre a massa e o volume de cada briquete.

### **3.5.2. Expansão longitudinal**

A expansão longitudinal foi analisada medindo o comprimento (sentido de compactação) dos briquetes com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 10), em intervalos de tempo determinados, durante um tempo de 72 horas após a compactação. Os briquetes produzidos a partir da compactação dos resíduos estudados foram mantidos em dessecador com sílica gel durante o ensaio, para que a umidade do ar não influenciasse na expansão.



**Figura 10** - Medida da expansão longitudinal dos briquetes.

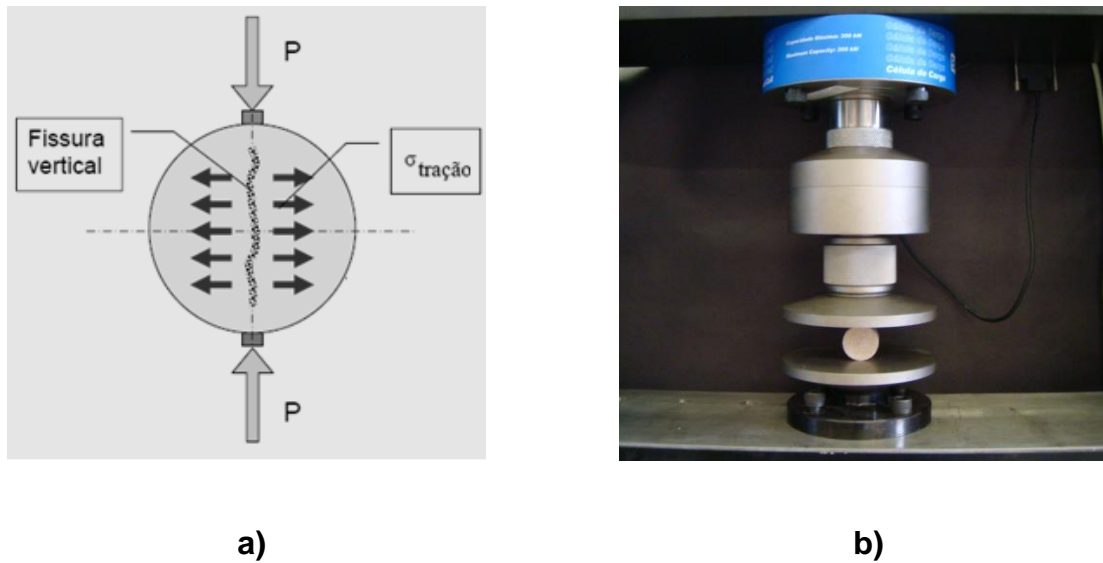
A expansão longitudinal,  $El$ , das amostras é calculada de acordo com a Equação 10.

$$El = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (10)$$

Na qual:  $l_0$  é o comprimento longitudinal da amostra logo após a compactação, e  $l_f$  é o comprimento longitudinal da amostra após um determinado tempo da compactação.

### **3.5.3. Resistência à tração por compressão diametral**

Este ensaio consiste em submeter corpos-de-prova cilíndricos a cargas de compressão, onde a tensão de compressão produz uma tensão de tração paralela ao plano de carregamento (Figura 11a). A resistência dos briquetes à compressão foi determinada para analisar seu comportamento mecânico quando submetido a uma determinada carga ou esforço. O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma máquina universal de ensaios, com capacidade máxima de 30.000 kgf (300 kN), modelo DL 30.000, 72 horas após a compactação dos resíduos. A carga foi aplicada no sentido transversal dos briquetes, perpendicular à pressão de compactação (Figura 11b). A velocidade da aplicação da carga utilizada para este ensaio foi de 3 mm/min.



**Figura 11** - Ensaio de tração por compressão diametral. a) Representação do corpo-de-prova durante o ensaio; b) Máquina no momento do ensaio.

#### 3.5.4. Absorção de umidade

Os ensaios de absorção de umidade foram realizados em uma câmara climática com umidade relativa e temperatura constante. As amostras dos briquetes foram condicionadas em ambiente com umidade relativa de  $(90 \pm 5)$  % e temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C. Após a compactação dos resíduos, antes de iniciar o condicionamento, as amostras dos briquetes foram pesadas e colocadas na câmara climática. Em intervalos de tempo determinados as amostras foram retiradas da câmara climática e pesadas em uma balança analítica. Os ensaios foram realizados até os corpos-de-prova atingissem o equilíbrio (massa constante).

A quantidade de água absorvida,  $A_a$ , pelos briquetes é expressa pela Equação 11.

$$A_a = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100 \quad (11)$$

Sendo:  $M_t$  massa do briquete em gramas após um tempo de exposição a um ambiente de umidade relativa controlada, e  $M_0$  massa do briquete em gramas antes da exposição ao ambiente condicionante.

### **3.5.5. Poder calorífico superior (PCS)**

O poder calorífico é uma importante característica dos combustíveis e refere-se à quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível. O poder calorífico superior (PCS) dos briquetes foi determinado após a compactação dos resíduos, com o teor de umidade utilizado no processo (10%b.s.). A análise de poder calorífico superior dos briquetes foi realizada obedecendo à norma NBR 8633. Para realização das análises de PCS foram utilizados um calorímetro modelo C2000 e uma bomba calorimétrica modelo C500, ambos marca IKA.

#### **4. Resultados e Discussão**

São apresentados a seguir os resultados referentes aos ensaios de caracterização do bagaço de cana, da serragem de eucalipto e da serragem de pinus e também da caracterização dos briquetes produzidos a partir da compactação dos resíduos.

##### **4.1 Resultados da caracterização dos resíduos lignocelulósicos**

Todas as análises realizadas na caracterização dos resíduos foram realizadas em triplicata. Os resultados referentes à caracterização dos resíduos lignocelulósicos são apresentados na sequência.

###### **4.1.1. Tamanho das partículas (Granulometria)**

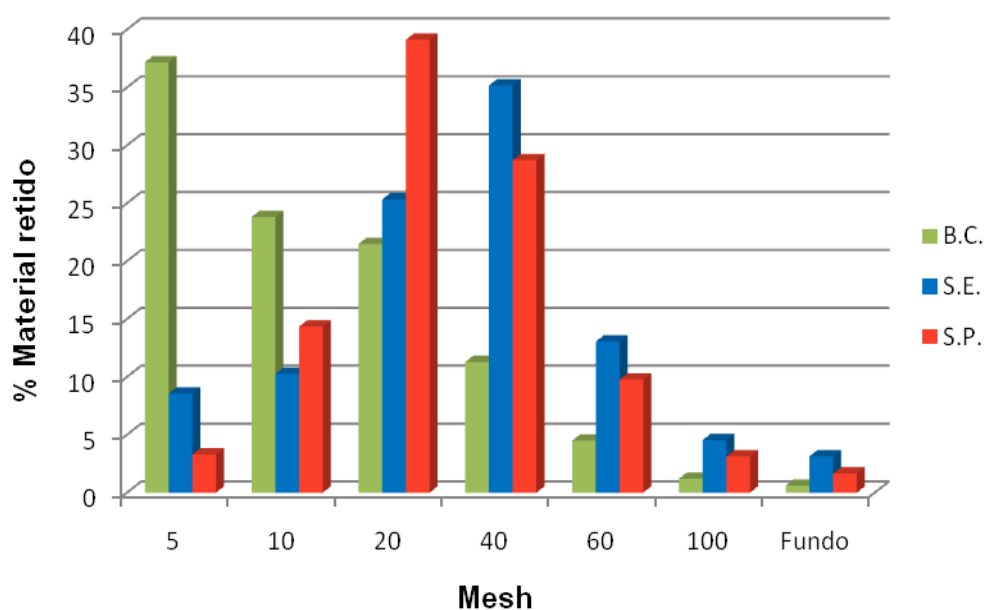
A tabela 2 apresenta os resultados da análise granulométrica dos resíduos na forma em que foram coletados.



**Tabela 2** - Análise granulométrica dos resíduos lignocelulósicos analisados.

<i>Peneiras</i>		<i>% retida por peneira</i>		
<i>Tyler (Mesh)</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>bagaço de cana</i>	<i>serragem de eucalipto</i>	<i>serragem de pinus</i>
5	4,00	37,17	8,55	3,29
10	2,00	23,81	10,26	14,34
20	0,84	21,47	25,32	39,12
40	0,42	11,28	35,17	28,72
60	0,25	4,48	13,04	9,76
100	0,15	1,2	4,53	3,12
Fundo	< 0,15	0,59	3,13	1,65

Analisando os resultados da análise granulométrica observa-se que o bagaço de cana apresentou partículas de maiores dimensões em comparação as serragens de eucalipto e pinus, o que pode resultar em uma baixa densidade a granel. A Figura 13 apresenta a distribuição granulométrica dos resíduos.

**Figura 12** - Distribuição granulométrica dos resíduos.

Observando a distribuição granulométrica dos resíduos, verificou-se que a maior fração dos materiais estava retida na granulometria de 20 e 40 mesh. Para obter uma uniformidade granulométrica, optou-se trabalhar com a fração que passou pela peneira de 20 mesh e ficou retida na peneira de 40 mesh.

#### 4.1.2. Densidade a granel

Os resultados da densidade a granel dos resíduos nas condições em que foram coletados e após a secagem em estufa, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Densidade a granel dos resíduos.

	<i>Massa específica a granel (kg.m<sup>-3</sup>)</i>			
	<i>T.U.(%b.s.)</i>		<i>T.U.(%b.s.)</i>	
<b>Bagaço de cana</b>	113,75	<b>143,75</b>	4,2	<b>68,86</b>
<b>Serragem de eucalipto</b>	58,46	<b>228,31</b>	3,7	<b>144,97</b>
<b>Serragem de pinus</b>	81,57	<b>272,76</b>	3,5	<b>161,56</b>

Analisando os resultados da Tabela 3, observa-se que o bagaço de cana apresentou densidade a granel inferior a das serragens de eucalipto e pinus, o que torna seu transporte e armazenamento mais caro, comparado ao dos outros resíduos. A diferença entre a densidade a granel do bagaço de cana e a serragem de pinus foi de 89,75%. Após a secagem em estufa, a diferença entre a densidade do bagaço de cana e a serragem pinus foi de 134,62%.

### 4.1.3. Análise imediata

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise imediata do bagaço de cana e das serragens de eucalipto e pinus.

**Tabela 4** - Análise imediata dos resíduos.

	<b>Teor de Umidade (%)</b>	<b>Teor de Voláteis (%)</b>	<b>Carbono Fixo (%)</b>	<b>Teor de Cinzas (%)</b>
<i>Bagaço de cana</i>	<b>113,75</b>	<b>75,86</b>	<b>15,52</b>	<b>8,62</b>
<i>Serragem de eucalipto</i>	<b>58,26</b>	<b>83,48</b>	<b>15,20</b>	<b>1,32</b>
<i>Serragem de pinus</i>	<b>81,07</b>	<b>82,76</b>	<b>16,79</b>	<b>0,45</b>

Dados expressos em base seca.

Os resultados de teor de umidade dos resíduos analisados apresentaram valores muito superiores ao teor de umidade ideal, recomendados na literatura para a compactação, entre 8 e 12% (GROVER; MISHRA, 1996). Esses resultados indicam a necessidade de secagem dos resíduos, para que atinjam o teor de umidade ideal para a compactação.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo obtidos para as serragens de eucalipto e pinus se encontram no intervalo determinado por Brito e Barrichello (1982), que preconizaram, em termos gerais, teores de matérias voláteis entre 75% a 85% e de carbono fixo entre 14% a 25% para a madeira.

O maior teor de carbono fixo encontrado na serragem de *Pinus sp* comparado aos outros resíduos pode estar relacionado ao maior teor de lignina insolúvel encontrado para este resíduo. De acordo com Brito e Barrichello (1977), a carbonização de um material lignocelulósico rico em lignina produz

um carvão com alto teor de carbono fixo. Isto se deve a maior resistência à decomposição térmica que a lignina tem em relação aos outros componentes dos materiais lignocelulósicos.

Os resultados obtidos de teor de voláteis e carbono fixo para o bagaço de cana estão de acordo com Jenkins (1990), que encontrou valores de 73,78% de materiais voláteis e 14,95% de carbono fixo para este resíduo.

Combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, o que é vantajoso, devido ao maior tempo dentro das câmaras de combustão, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo (BRITO; BARRICHELO, 1982).

O maior teor de cinzas, encontrado no bagaço de cana (8,62%), em comparação aos outros resíduos, pode inviabilizar a utilização deste resíduo como combustível em alguns sistemas de aquecimento, devido ao excesso de material residual ao fim da combustão, gerando uma maior manutenção. Por exemplo, de acordo com as normas europeias para *pellets*, o teor de cinzas máximo aceitável é de 0,5%. Até mesmo os resultados de teor de cinzas obtidos na serragem de eucalipto (1,32%) estão acima do máximo aceitável pelas normas.

#### **4.1.4. Teor de extrativos**

A Tabela 5 apresenta os resultados das análises de teor de extrativos solúveis em água (70°C) e em cicloexano/etanol dos resíduos analisados.

**Tabela 5** - Teor de extrativos dos resíduos lignocelulósicos analisados.

	<b>Solúveis em Água 70°C (%)</b>	<b>Solúveis em Cicloexano/Etanol (%)</b>
<i>Bagaço de cana</i>	<b>8,36</b>	<b>3,46</b>
<i>Serragem de eucalipto</i>	<b>3,94</b>	<b>1,92</b>
<i>Serragem de pinus</i>	<b>3,62</b>	<b>2,85</b>

Dados expressos em base seca.

O bagaço de cana apresentou maiores teores de extrativos solúveis em água, como também solúveis em cicloexano/etanol em comparação as serragens de eucalipto e pinus. Isso se deve ao alto teor de açúcares residuais presentes no bagaço, o que pode interferir negativamente no poder calorífico.

#### **4.1.5. Teor de lignina Klason insolúvel**

Os resultados do teor de lignina Klason insolúvel presente nos resíduos lignocelulósicos analisados são apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** - Teor de lignina Klason insolúvel dos resíduos.

	<b>Teor de lignina Klason insolúvel (%)</b>
<i>Bagaço de cana</i>	<b>19,11</b>
<i>Serragem de eucalipto</i>	<b>25,44</b>
<i>Serragem de pinus</i>	<b>27,65</b>

Dados expressos em base seca.

Observa-se que a serragem de pinus apresentou o maior teor de lignina insolúvel entre os resíduos analisados, o que pode ser um ponto favorável para as propriedades energéticas do material. Segundo Jara (1989), o poder calorífico superior da madeira, além da umidade, está muito influenciado pela constituição química da madeira, principalmente a lignina e extrativos.

No caso da compactação, o teor de lignina dos resíduos não influenciou na formação dos briquetes, pois não houve aquecimento no processo de compactação dos mesmos. Sem aquecimento a lignina não amolece, com isso não age como um aglutinante, favorecendo a adesão das partículas. Ainda que a serragem de pinus tenha apresentado o maior percentual de lignina, os briquetes formados tiveram menor resistência à tração por compressão diametral comparada ao dos outros resíduos (ver 4.3.3.).

#### **4.2. Características dos resíduos preparados para a compactação**

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise de teor de umidade e da densidade a granel dos resíduos preparados para a compactação, todos com a mesma granulometria (20 a 40 mesh).

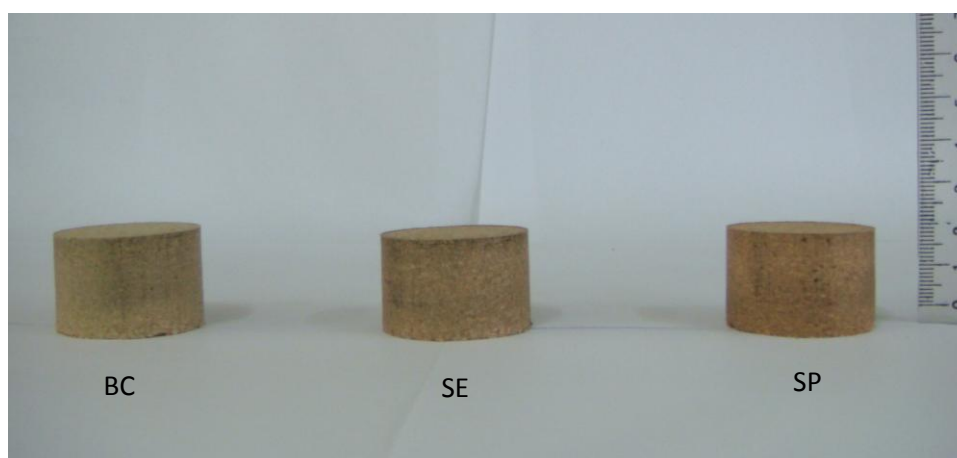
**Tabela 7** – Características dos resíduos preparados para a compactação.

	<b>Teor de Umidade (%b.s.)</b>	<b>Massa específica a granel (kg.m<sup>-3</sup>)</b>
<i>Bagaço de cana</i>	<b>10,03</b>	<b>149,65</b>
<i>Serragem de eucalipto</i>	<b>9,94</b>	<b>178,54</b>
<i>Serragem de pinus</i>	<b>9,96</b>	<b>192,12</b>

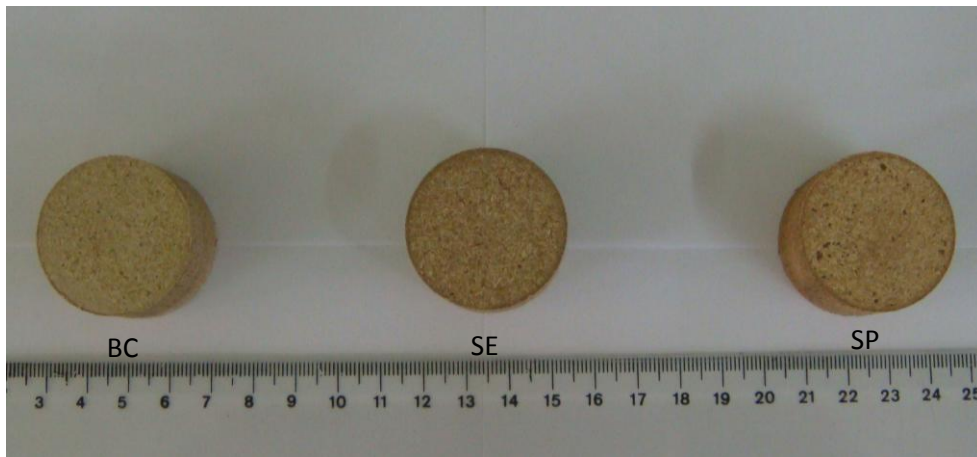
Observando os resultados apresentados na Tabela 7, verifica-se que o teor de umidade dos resíduos após a preparação para a compactação, estava de acordo com o teor de umidade esperado (10%b.s.).

#### 4.3. Resultados da caracterização dos briquetes

Os briquetes produzidos a partir da compactação do bagaço de cana (BC), serragem de eucalipto (SE) e serragem de pinus (SP), apresentaram boa formação, como pode ser observado nas imagens da Figura13, que mostra os briquetes logo após a compactação.



a)



b)

**Figura 13** – Briquetes produzidos a partir da compactação dos resíduos.

a) seção longitudinal; b) seção transversal.

Para cada ensaio foram utilizados 10 briquetes de cada resíduo, com exceção da análise de poder calorífico superior (PCS) que foi realizada em triplicata. Os resultados referentes aos ensaios de caracterização dos briquetes produzidos a partir da compactação dos resíduos analisados são apresentados na seqüência.

#### **4.3.1. Densidade aparente**

A Tabela 8 apresenta os resultados da densidade aparente média dos briquetes, 72 horas após a compactação e o desvio padrão dos dados.



**Tabela 8** - Densidade aparente média dos briquetes.

	<b>Massa específica aparente média (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<i>Briquetes BC</i>	<b>840,47 (a)</b>	<b>6,87</b>
<i>Briquetes SE</i>	<b>871,84 (b)</b>	<b>7,15</b>
<i>Briquetes SP</i>	<b>852,54 (c)</b>	<b>2,64</b>

As letras (a), (b) e (c) indicam os resultados do teste de Tukey.

Os valores da densidade aparente obtidos para os briquetes produzidos encontram-se abaixo dos valores indicados por Quirino e Brito (1991), entre 900 e 1000 kg.m<sup>-3</sup>. Isso pode ter ocorrido devido a utilização de diferentes processos de compactação. A maior densidade aparente obtida (871,84 kg.m<sup>-3</sup>) foi dos briquetes de serragem de eucalipto (*Briquetes SE*). Os briquetes de bagaço de cana (*Briquetes BC*) apresentaram a menor densidade aparente entre os briquetes analisados (840,47 kg.m<sup>-3</sup>). O teste de Tukey mostrou que a densidade aparente média dos briquetes foi estatisticamente diferente.

A densidade aparente encontrada para os briquetes mostra a redução de volume que pode ser alcançada em relação à forma em que se encontravam os resíduos nas indústrias. A densidade a granel dos resíduos com umidade controlada, após secagem em estufa era de 68,86 kg.m<sup>-3</sup> para o bagaço de cana, 144,97 kg.m<sup>-3</sup> para a serragem de eucalipto e de 161,56 kg.m<sup>-3</sup> para a serragem de pinus. Isso representa uma redução de volume de 12,2 vezes para o bagaço de cana, 6,01 vezes para a serragem de eucalipto e 5,28 vezes para a serragem de pinus.

### 4.3.2. Expansão longitudinal

As medidas da expansão longitudinal dos briquetes foram realizadas em intervalos de tempo definidos, durante um período de 72 horas após a compactação.

Os resultados da expansão longitudinal média dos briquetes após 72 horas de ensaio são apresentados na Tabela 9.

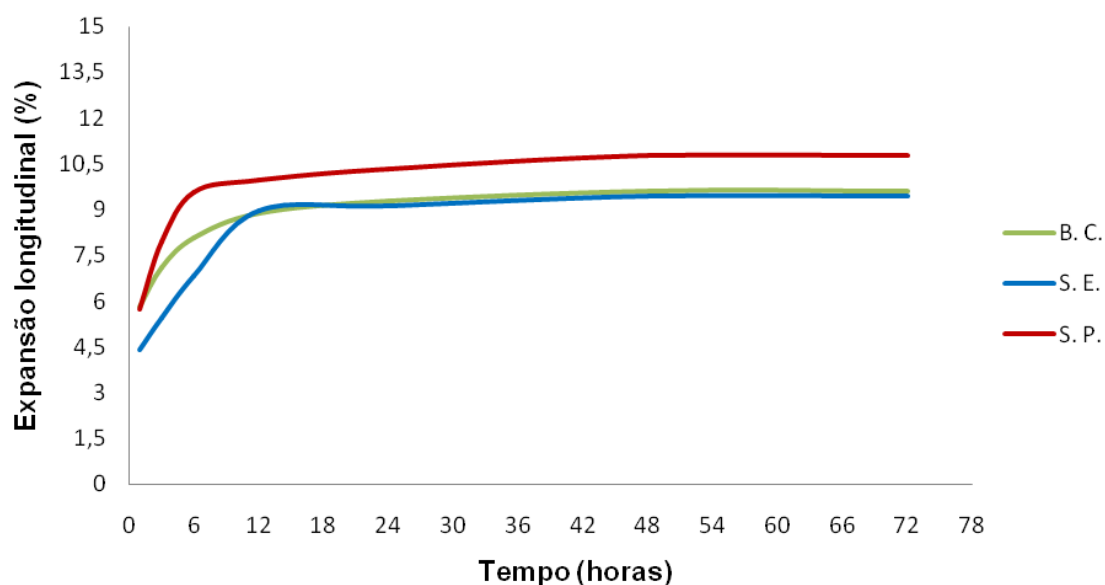
**Tabela 9** - Expansão longitudinal média dos briquetes após 72 horas da compactação.

	<b>Expansão longitudinal média (%)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<i>Briquetes BC</i>	<b>9,61 (a)</b>	<b>0,53</b>
<i>Briquetes SE</i>	<b>9,44 (a)</b>	<b>0,27</b>
<i>Briquetes SP</i>	<b>10,76 (b)</b>	<b>0,28</b>

As letras (a) e (b) indicam os resultados do teste de Tukey.

Observa-se que os briquetes que apresentaram a maior expansão durante o período do ensaio entre os briquetes analisados, foram os briquetes de serragem de pinus (*Briquetes SP*). A maior expansão dos briquetes de serragem de pinus indica que não ocorreu uma boa adesão entre as partículas, o que pode influenciar na resistência mecânica dos briquetes. O teste de Tukey mostrou que a expansão longitudinal média dos briquetes de bagaço de cana (*Briquetes BC*) e serragem de eucalipto (*Briquetes SE*) foram estatisticamente iguais. O teste revelou ainda que a expansão dos *Briquetes SP* foi estatisticamente diferente dos demais.

O gráfico da Figura 14 apresenta a expansão longitudinal média dos briquetes, examinados ao longo de 72 horas após a compactação.



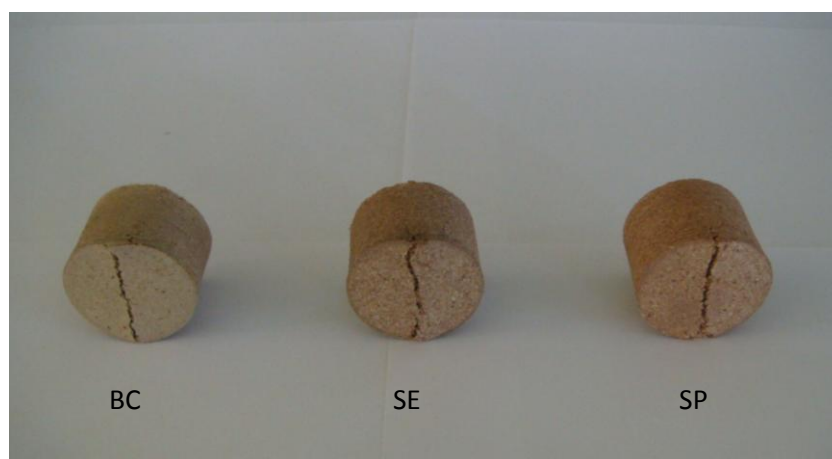
**Figura 14** - Expansão longitudinal média dos briquetes dos resíduos.

Analisando o gráfico da expansão média, observa-se que os briquetes analisados apresentaram maior expansão durante as primeiras 12 horas após a compactação.

A expansão longitudinal é uma propriedade que deve ser observada com cuidado no processo de compactação, pois é inversamente proporcional à resistência mecânica dos briquetes.

### 4.3.3. Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 15 apresenta a imagem dos briquetes de bagaço de cana, serragem de eucalipto e serragem de pinus, após o ensaio de tração por compressão diametral.



**Figura 15** - Briquetes após ensaio de tração por compressão diametral. BC – bagaço de cana; SE – serragem de eucalipto e SP – serragem de pinus.

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral dos briquetes são apresentados na Tabela 10.

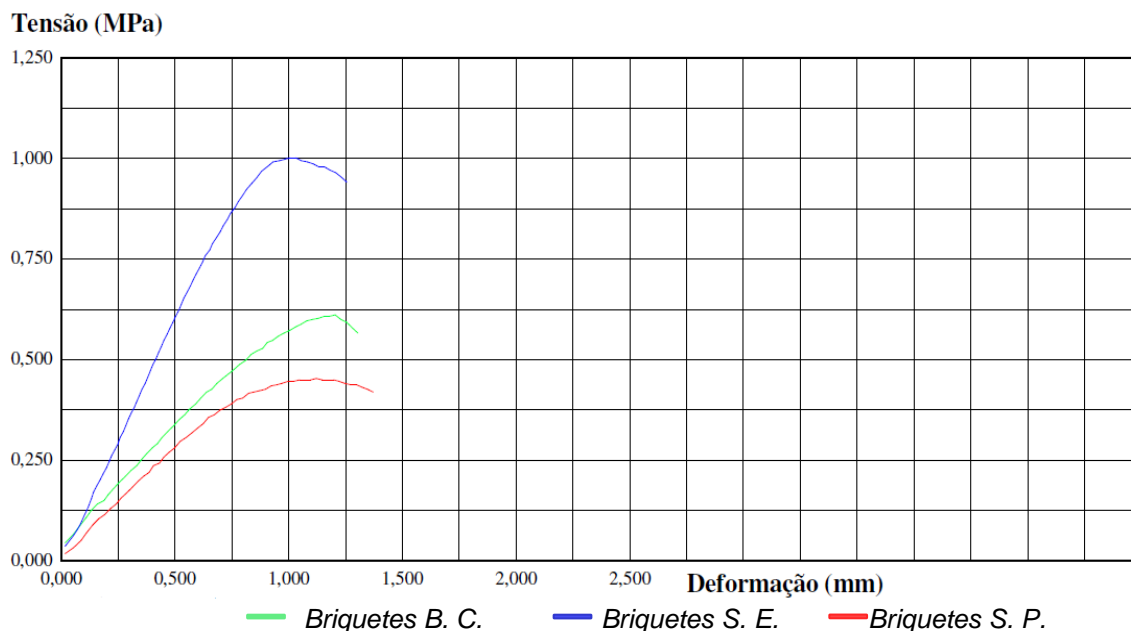
**Tabela 10** - Resistência dos briquetes no ensaio de tração por compressão diametral.

	<i>Tensão máxima média (MPa)</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Força máxima média (kgf)</i>	<i>Desvio Padrão</i>
<i>Briquetes B.C.</i>	<b>0,61 (a)</b>	<b>0,03</b>	<b>52,92 (a)</b>	<b>2,25</b>
<i>Briquetes S.E.</i>	<b>1,01 (b)</b>	<b>0,04</b>	<b>86,92 (b)</b>	<b>3,25</b>
<i>Briquetes S.P.</i>	<b>0,45 (c)</b>	<b>0,02</b>	<b>38,53 (c)</b>	<b>1,69</b>

As letras (a), (b) e (c) indicam os resultados do teste de Tukey.

Analisando os resultados do ensaio de tração por compressão diametral, verificamos que os briquetes de serragem de eucalipto (*Briquetes S. E.*) apresentaram maior resistência em comparação aos briquetes de bagaço de cana e de serragem de pinus. A baixa resistência dos briquetes de serragem de pinus comparado aos outros, pode ter ocorrido devido a granulometria e o teor de umidade utilizados não serem os ideais para o processo de compactação do pinus. O teste de Tukey mostrou que a tensão máxima média e a força máxima média dos briquetes no ensaio de tração por compressão diametral foi estatisticamente diferente.

A Figura 16 mostra o gráfico de tensão x deformação média dos briquetes.

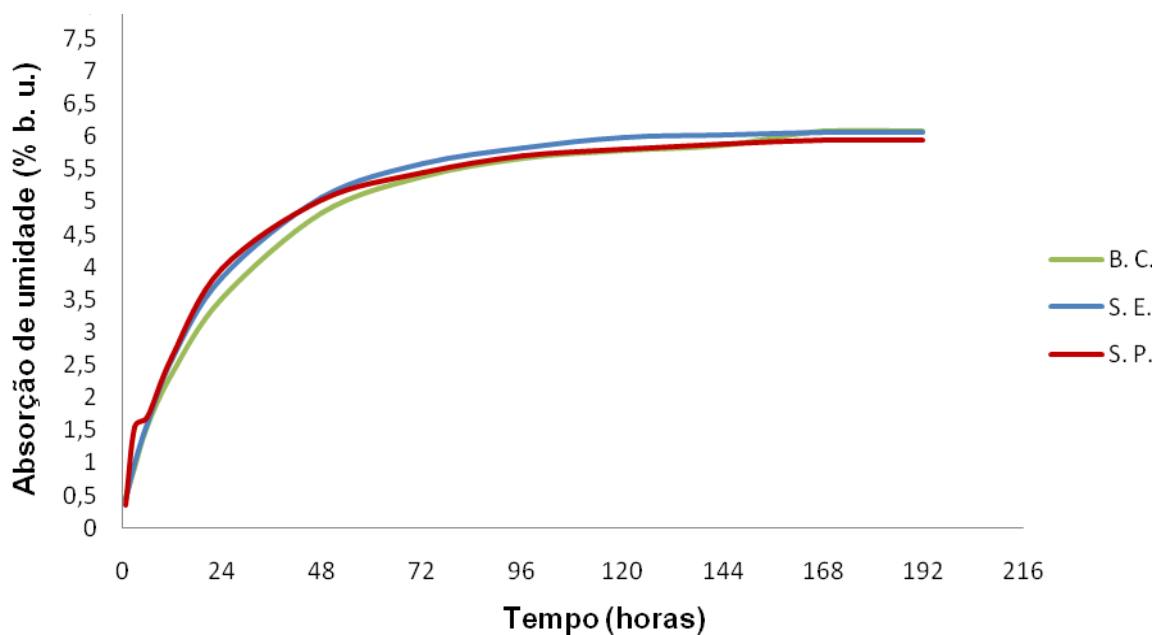


**Figura 16** - Gráfico tensão x deformação média dos briquetes.

#### 4.3.4. Absorção de umidade

O ensaio de absorção de umidade durou 8 dias, tempo necessário para que os briquetes atingissem a umidade de equilíbrio (massa constante) em câmara climática com umidade relativa de  $(90 \pm 5) \%$  e temperatura de  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . O teor de umidade médio dos briquetes ao final do ensaio na câmara climática foi de 16,5%.

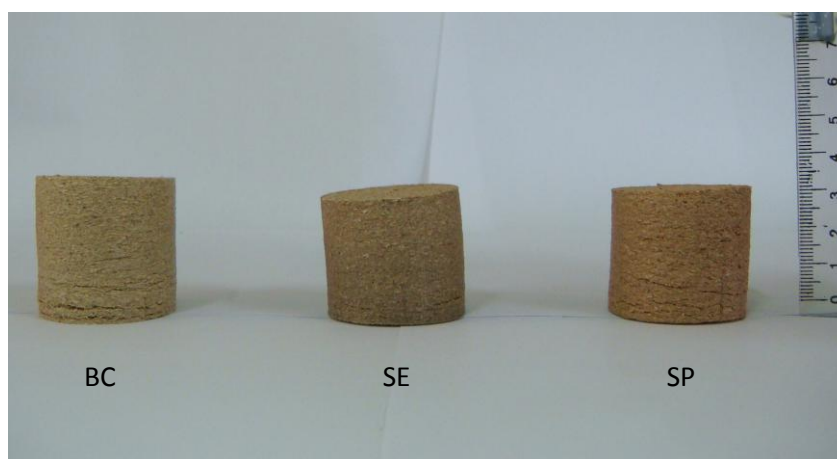
A Figura 17 apresenta as curvas de absorção de umidade dos briquetes ao longo do tempo.



**Figura 17** - Gráfico da absorção de umidade em função do tempo.

Observa-se, no gráfico da Figura 17, que a dinâmica da absorção de umidade dos briquetes ao longo do ensaio foram semelhantes. O maior incremento foi observado nas primeiras 48 horas para os três tipos de materias.

A Figura 18 mostra os briquetes após o ensaio de absorção de umidade em câmara climática.



**Figura 18.** Briquetes após ensaio de absorção de umidade.

#### 4.3.5. Poder calorífico superior (PCS)

Os resultados do poder calorífico superior dos briquetes dos resíduos em estudo são apresentados na Tabela 12.

**Tabela 11** - Poder calorífico superior (PCS) dos briquetes.

	<b>Poder calorífico superior</b>	
	<b><i>kcal.kg<sup>-1</sup></i></b>	<b><i>MJ.kg<sup>-1</sup></i></b>
<i>Briquetes B.C.</i>	<b>4138</b>	<b>17,38</b>
<i>Briquetes S.E.</i>	<b>4436</b>	<b>18,63</b>
<i>Briquetes S.P.</i>	<b>4675</b>	<b>19,64</b>

Valores médios em triplicata

O Poder calorífico superior (PCS) obtido para os briquetes estão próximos ao valor encontrado por Quirino et al. (2005), para briquetes de resíduos de madeira ( $4540 \text{ kcal.Kg}^{-1}$ ). Os briquetes que apresentaram maior PCS entre os briquetes analisados foram os de pinus. A diferença entre o PCS obtido para os briquetes de serragem de pinus e o PCS obtido para os briquetes de bagaço de cana foi de 12,98 %. O maior PCS obtido para os briquetes de pinus, comparado aos outros briquetes pode estar relacionado ao maior teor de lignina encontrado para este resíduo.



## 5. Conclusões

Os resultados mostraram que todos os materiais analisados podem ser utilizados na produção de briquetes. Foi possível a produção de briquetes de resíduos lignocelulósicos através do processo de compactação sem aquecimento. A compactação melhorou a qualidade dos biocombustíveis sólidos.

Entre os resíduos lignocelulósicos analisados, o que apresentou as melhores propriedades químicas para a utilização como combustível sólido (maiores teores de lignina e carbono fixo e menores teores de voláteis e cinzas), foi a serragem de *Pinus sp.* Como resultado, os briquetes de pinus foram os que apresentaram o maior poder calorífico. Isso demonstra a importância de se conhecer as características da matéria-prima, que irão interferir na qualidade do produto final.

Entre os briquetes produzidos a partir da compactação dos resíduos lignocelulósicos estudados neste trabalho, os que apresentaram a maior resistência no ensaio de tração por compressão diametral foram os briquetes de serragem de *Eucalyptus sp.* Entretanto para afirmar uma boa resistência mecânica seria necessário a realização de outros ensaios mecânicos que possam simular as cargas e esforços sofridos pelos briquetes durante o processo de utilização desse biocombustível sólido.

Os briquetes produzidos a partir da compactação do bagaço de Cana-de-açúcar, da serragem de *Eucalyptus sp* e da serragem de *Pinus sp*, apresentaram massa específica aparente, expansão longitudinal e resistência à tração por compressão diametral estatisticamente diferentes. Isso indica que o tipo de material utilizado na produção interfere no processo de formação e na qualidade dos briquetes.

## **6. Sugestões**

Estudar a compactação de resíduos lignocelulósicos com diferentes granulometrias e diferentes teores de umidade e avaliar as condições ideais de cada resíduo para a compactação.

Realizar outros tipos de ensaio mecânico para avaliar a resistência mecânica dos briquetes.

Analisar a influência de cada variável do processo de compactação na qualidade dos briquetes formados.

Estudar os mecanismos que permitem a adesão das partículas no processo de compactação de materiais lignocelulósicos para diminuir a expansão longitudinal, que interfere diretamente na resistência mecânica dos briquetes.

## **7. Referências**

ANTUNES, R.C., Briquetagem de carvão vegetal. In: PENEDO, W.R. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte; CETEC, v.1, p.197-206, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6922 - Carvão vegetal – Determinação da densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217 - Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112 - Carvão vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633 - Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

BHATTACHARYA, S.C. Fuel for Thought: The Status of Biomass Energy in Developing Countries. Renewable energy world. v. 7, n. 6, p. 122-130, 2004.

BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. State of the art for biomass densification. Energy Sources. New York. v. 11, n. 3, p. 161-182, 1989.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlação entre as características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 1 densidade e teor de lignina na madeira de eucalipto. IPEF, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS. São Paulo, p. 101-137, 1982.

DEMIRBAS, A. "Combustion characteristics of different biomass fuels", Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, p. 219–230, 2004.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. The briquetting of agricultural wastes for fuel, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1990.

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

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

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

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

KAREKESI, S.; COELHO, S. T.; LATA, K. Traditional Biomass Energy: Improving its Use and Moving to Modern Energy Use. In: International Conference for Renewable Energies, 2004, Bonn. Thematic Background Paper, Alemanha, 2004.

LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, p. 177-186, 2000.

MALHERB, S.; CLOETE, T. E. Lignocellulose biodegradation: Fundamentals and applications. *Re/Views Environ. Sci. Bio/Technol.* v.1, p.105-114, 2002.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior. *Biomass and Bioenergy*, v. 27, n.6, p. 653-669, 2004.

OMACHI, I. H.; RODRIGUES, L. G.; STOLF, M.; CANNAVAL, R.; SOBREIRO, R. Produção de biomassa florestal para exportação: o caso Amcel. *Revista Biomassa e Energia*, Viçosa, v. 1, n.1, p. 29-36, 2004.

O'SULLIVAN, C. A. Cellulose: the structure slowly unravels. *Cellulose*, v. 4, n. 3, p. 173-207, 1997.

OVEREND, R. "Biomass conversion technologies", Biomass Document Database – U.S. Department of Energy, 2003.

PANDEY, A.; SOCCOL, C.R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V.T. Biotechnological potential of agro-industrial residues: Sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*. v.74, p.69-80, 2000.

QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília: LPF/IBAMA, 2003. 14p.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. Brasília: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. 1991. 16p.

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da Madeira*, n. 89, p. 100-106, 2005.

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

TABARÉS, J. L. M.; ORTIZ, E.; GRANADA, E.; VIAR, F. P. Feasibility study of energy use for densificated lignocellulosic material (briquettes). *Fuel*, v. 79, n. 10, p. 1229-1237, 2000.

Technical Association of Pulp and Paper Industry – TAPPI. Standart Method T207 om-93 – Tappi Test Methods, 1993.

Technical Association of Pulp and Paper Industry – TAPPI. Standart Method T212 om-98 – Tappi Test Methods, 1998.

Technical Association of Pulp and Paper Industry – TAPPI. Standart Method T222 om-88 – Tappi Test Methods, 1988.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos florestais. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III. Rio Branco: Suprema. p. 195-241, 2008.

VARELA, M.; LECHÓN, Y.; SAÉZ, R. Environmental and socioeconomic aspects in the strategic analysis of a biomass power plant integration. *Biomass and Bioenergy*, n. 17, p. 405-413, 1999.

Wamukonya, L.; B. Durability and relaxation of sawdust and wheatstraw briquettes as possible fuels for Kenya. *Biomass and Biomass*, v. 8, n. 3, p. 175-179, 1995.