

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética

Ana Lúcia Piedade Sodero Martins Pincelli

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2011**

**Ana Lúcia Piedade Sodero Martins Pincelli
Engenheiro Florestal**

**Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus,
submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ OTÁVIO BRITO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2011**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Pincelli, Ana Lúcia Piedade Sodero Martins

Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética / Ana Lúcia Piedade Sodero Martins Pincelli. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. - - Piracicaba, 2011.

126 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Energia de biomassa 2. Eucalipto 3. Pinheiro 4. Resíduos 5. Torrefação
6. Tratamento térmico I. Título

CDD 634.9734
P647c

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

HOMENAGEM SAUDOSA

Ao meu pai, Prof. Dr. Paulo Soderó Martins,
extraordinário homem e pesquisador. A ele meu
reconhecimento, pois seu exemplo e incentivo me
levaram a esta conquista.

DEDICO

À minha mãe Maria de Lourdes,
quem me fortalece para novas conquistas.

OFEREÇO

Ao meu esposo Alexandre, grande companheiro.

Aos meus filhos Gabriel Alexandre e Isadora,
incentivo maior para o término deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, pela chance de aprimoramento profissional.

Ao Prof. Dr. José Otávio Brito, pelo profissionalismo, orientação efetiva, constante incentivo e principalmente pela confiança e amizade mantidas durante os anos de convivência.

Ao Prof. Dr. Mario Tomazello Filho, pelo apoio como coordenador do Curso de Pós-Graduação em Recursos Florestais.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão de bolsa de estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pela oportunidade de realizar uma viagem de estudos à França graças aos recursos financeiros.

Aos funcionários e estagiários do Departamento de Ciências Florestais, em especial aos técnicos Udemilson Luis Ceribelli e Maria Regina Buch dos Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia - LQCE, pela dedicação constante.

À empresa Duratex (Duraflora S.A.), pelo fornecimento dos resíduos da colheita florestal utilizados neste trabalho.

À equipe da serraria Tabapinus - Serrarias Reunidas LTDA., por seu apoio na picagem dos resíduos florestais.

À equipe do "Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt-Bois" - LERFOB ("Equipe Bois, Biomatériaux, Biomasse"), AgroParisTech/INRA, pela oportunidade de desenvolvimento de parte das pesquisas deste trabalho, em especial ao Prof. Dr. Patrick Perré pela atenção dispensada e à pesquisadora Giana Almeida Perré pelo aconselhamento e apoio.

Aos colegas José Carlos Arthur Junior e Edgar de Souza Vismara, pelo auxílio nas análises estatísticas.

À bibliotecária Eliana Maria Garcia pela orientação bibliotecária.

Aos colegas do Departamento de Ciências Florestais, em especial aos companheiros do Grupo Bioenergia e Bioprodutos de Base Florestal (LQCE), e a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Biomassa e energia.....	25
2.2 Biomassa florestal e geração de resíduos.....	28
2.3 Características da biomassa e a geração de energia	29
2.4 Tratamento térmico da madeira	33
2.4.1 Tratamento térmico e características químicas da madeira	37
2.4.2 Tratamento térmico e características físicas da madeira	40
3 MATERIAL E MÉTODOS	45
3.1 Material.....	45
3.2 Métodos.....	45
3.3 Coleta do material no campo.....	47
3.4 Pesagem e picagem do material	49
3.5 Tratamentos térmicos.....	51
3.6 Caracterização dos resíduos.....	55
3.7 Análises estatísticas	62
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
4.1 Quantidade de resíduos florestais por unidade de área e árvore e teor de umidade	65
4.2 Rendimento do tratamento térmico	67
4.3 Densidade do material a granel.....	69
4.4 Granulometria.....	70
4.5 Poder calorífico superior.....	77
4.6 Índice de combustão (ICOM).....	79
4.7 Análise Imediata.....	84

4.8 Resistência à moagem	89
4.9 Microscopia eletrônica	95
5 CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS	101
ANEXO	113

RESUMO

Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética

No contexto mundial atual, a busca de fontes de energia renováveis e menos poluentes que o petróleo tornou-se inevitável. O uso da biomassa como fonte de energia é extremamente importante, devido principalmente ao seu caráter renovável e a sua abundância. Os resíduos florestais são cada vez mais preconizados como uma importante fonte de biomassa. Isto se deve a sua abundância, facilidade de provisão e baixo custo. Podemos citar, como exemplo, os resíduos gerados durante a colheita florestal (cascas, folhas, galhos, ponteiros, entre outros) e durante o processamento mecânico da madeira (costaneiras, aparas, pó de serra, entre outros). O uso deste tipo de material para fins energéticos vem crescendo, porém, há um grande espaço para melhorias a serem implementadas nesse campo, envolvendo o melhor conhecimento de suas características e o potencial de aplicação de processos para sua conversão em produtos mais otimizados em relação aos seus valores energéticos. Diante desse quadro, e em se considerando a madeira, surge a oportunidade para adoção de processos de tratamento térmico, para os quais já existem referências que indicam a ocorrência de mudanças nas características desse material, o que conduz à previsão de se poder obter resultados positivos em relação ao que se exige para usos energéticos. Além do tradicional e amplamente usado processo de secagem, constata-se, no campo do tratamento térmico, o crescimento do interesse pela aplicação da chamada torrefação e da termorreificação, compreendendo faixas de temperatura entre 150 e 300 °C. Neste contexto, resíduos da colheita florestal de eucalipto e pinus foram submetidos a tratamento térmico conduzido em estufa elétrica laboratorial, numa faixa de temperatura entre 140 e 300 °C. O objetivo foi estudar as alterações que o tratamento pudesse proporcionar às características do material, no sentido de se potencializar ainda mais o seu uso para fins energéticos, mediante a avaliação da densidade a granel do material, tamanho das partículas dos resíduos, poder calorífico superior, índice de combustão, análise imediata, resistência à moagem (redução granulométrica) e avaliação de imagens microscópicas. Os resultados indicaram, para ambas as espécies, que o aquecimento exerceu influência significativa nos rendimentos mássicos e nas características dos ensaios acima citados, com alteração dos valores com a elevação da temperatura, exceto para o teor de cinzas do eucalipto. A influência exercida pelo tratamento térmico foi mais evidente a partir de 220 °C, sendo isto mais fortemente observado à temperatura de 300 °C, com a constatação da maior fragmentação dos materiais tratados em comparação ao material testemunha. Além do aumento da friabilidade dos materiais estudados, constatado pelo ensaio de resistência à moagem, onde houve um relevante aumento da quantidade de material de baixa granulometria (menor que 4 mm), os mesmos apresentaram um maior ganho energético (maior poder calorífico) levando-se em conta a testemunha, principalmente a 300 °C, com índices de combustão elevados para os resíduos de eucalipto e pinus.

Palavras-chave: Torrefação; Termorreificação; Biomassa; Eucalipto; Pinus; Energia

ABSTRACT

Characteristics of eucalyptus and pine harvest residues, submitted to thermal treatment, with focus on energetic application

In the current worldwide context, the search for renewable energy sources and less polluting fuels than petroleum has become unavoidable. The use of biomass energy as source of energy is extremely important, especially due to its renewable character and abundance. The forest residues have been increasingly recommended as an important source of biomass. This is due to its abundance, facility of provision and low cost. We can cite examples such as the residues generated during the forest harvest (bark, leaves, branches, stem tips, among others) and during the mechanical processing of wood (slabs, chips, sawdust, among others). The use of this kind of material for energetic purposes has been increasing, however, there is room for benefits to be implemented in this field, involving a deeper knowledge on its characteristics and the potential for the application of processes to its conversion into more optimized products in relation to its energy values. In this scenario, and considering the wood, there comes the opportunity to the adoption of thermal treatment processes, to which there are already references that indicate the occurrence of changes in the characteristics of this material, which leads to the prediction of the possibility to obtain positive results in relation to what is demanded for energetic uses. Besides the traditional and widely used process of drying, it is observed, in the field of thermal treatment, the increase in the interest for the application of the so-called torrefaction and thermal rectification, comprising zones of temperature between 150 and 300 °C. In this context, residues of eucalyptus and pine forest harvest were submitted to a thermal treatment conducted in an electric laboratory oven, at temperatures between 140 and 300 °C. The goal was to study the alterations that the treatment might provide to the characteristics of the material, aiming at empowering its use to energetic purposes, through the density evaluation of a sample of the material, the size of residue particles, gross calorific value, combustion index, immediate analysis, resistance to grinding (particle size reduction) and the evaluation of microscopic images. The results indicated, for both species, that the heating caused a significant influence on the gravimetric yields and on the characteristics of the experiments cited above with changes in the values with the increase of the temperature, except for the ash content of eucalyptus. The effect of the thermal treatment was more evident from 220 °C, which is more strongly observed at the temperature of 300 °C, with a larger fragmentation of the treated materials in comparison to the control material. Besides the increase in the friability of the studied materials, found in the experiment of resistance to grinding, in which there was a relevant increase in the amount of low granulometry material (smaller than 4 mm), they presented a higher energetic gain (more calorific value) considering the witness, mainly at 300 °C, with high combustion indexes for the eucalyptus and pine residues.

Keywords: Torrefaction; Thermal rectification; Biomass; Eucalyptus; Pine; Energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência do estudo	46
Figura 2 - Coleta de resíduos gerados da colheita de madeira de (A) eucalipto e (B) pinus.....	48
Figura 3 - (A) Transporte de resíduos de eucalipto por meio de retroescavadeira e (B) descarregamento de resíduos de eucalipto no caminhão munck.....	49
Figura 4 - Pesagem de resíduos de (A) eucalipto e (B) pinus.....	49
Figura 5 - Picagem de resíduos de (A) eucalipto e (B) pinus por meio de picador a tambor	50
Figura 6 - (A) Bandejas com resíduos de eucalipto colocadas dentro da câmara metálica e (B) câmara fechada introduzida na estufa de tratamento térmico	52
Figura 7 - Gráficos de temperatura versus tempo usados para tratamentos térmicos a (A) 140, (B) 180, (C) 220, (D) 260 e (E) 300 °C.....	53
Figura 8 - Resíduos de (A) eucalipto e de (B) pinus tratados termicamente.....	54
Figura 9 - (A) Peneiras utilizadas para análises granulométricas dos resíduos florestais e (B) agitador eletromagnético de peneiras	58
Figura 10 - Determinação do poder calorífico dos resíduos com o equipamento “C 2000 calorimeter system” da Ika®-Werke.....	58

Figura 11 - Ensaio de análise imediata de uma amostra de resíduos utilizando cadinho de platina com tampa e mufla, com capacidade para atingir 1000 °C	59
Figura 12 - (A) Conjunto de teste de combustão mostrando balança, anteparo do combustor, registrador de temperatura e termômetro digital; (B) detalhe do combustor mostrando a grelha com amostras de resíduos	59
Figura 13 - Exemplo de teste de combustão de uma amostra de resíduos	60
Figura 14 - (A) Moinho centrifugal Jokro-Muhle utilizado para a moagem dos resíduos e (B) detalhe de uma das panelas utilizadas durante o ensaio; (C) Conjunto de panelas com resíduos antes e depois de moídos, para as temperaturas de tratamento a 220 e 300 °C	61
Figura 15 - Coleta de resíduos lenhosos com casca (> que 3 cm de diâmetro) de (A) eucalipto e (B) pinus.....	61
Figura 16 - Microscópio Eletrônico de Varredura Ambiental (ESEM), FEI QUANTA 200.....	62
Figura 17 - Rendimento mássico em função da temperatura de tratamento dos resíduos de eucalipto e pinus. As barras indicam o erro padrão das médias.....	68
Figura 18 - Densidade a granel dos resíduos de eucalipto e pinus. As barras indicam o erro padrão das médias	70

- Figura 19 - Porcentagem do material retido em função da abertura da malha, determinada pela análise granulométrica dos resíduos de eucalipto. As barras indicam o erro padrão das médias 75
- Figura 20 - Porcentagem do material retido em função da abertura da malha, determinada pela análise granulométrica dos resíduos de pinus. As barras indicam o erro padrão das médias 75
- Figura 21 - Tamanho médio dos resíduos de eucalipto e pinus em função do tratamento térmico. As barras indicam o erro padrão das médias 76
- Figura 22 - Poder calorífico superior dos resíduos de eucalipto e pinus. As barras indicam o erro padrão das médias 78
- Figura 23 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão dos resíduos de eucalipto 81
- Figura 24 - Consumo de massa durante o teste de combustão dos resíduos de eucalipto 81
- Figura 25 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão dos resíduos de pinus 83
- Figura 26 - Consumo de massa durante o teste de combustão dos resíduos de pinus 83
- Figura 27 - Análise imediata dos resíduos de eucalipto. As barras indicam o erro padrão das médias..... 85
- Figura 28 - Análise imediata dos resíduos de pinus. As barras indicam o erro padrão das médias..... 86

- Figura 29 - Análise granulométrica dos resíduos de eucalipto (1) antes e (2) após a moagem nas peneiras de (A) 16,0 mm, (B) 8,0 mm, (C) 4,0 mm e (D) menor que 4,0 mm. As barras indicam o erro padrão das médias.....90
- Figura 30 - Quantidades de resíduos de eucalipto retidas nas diferentes peneiras (A) antes e (B) após a moagem91
- Figura 31 - Análise granulométrica dos resíduos de pinus (1) antes e (2) após a moagem nas peneiras de (A) 16,0 mm, (B) 8,0 mm, (C) 4,0 mm e (D) menor que 4,0 mm. As barras indicam o erro padrão das médias.....92
- Figura 32 - Quantidades de resíduos de pinus retidas nas diferentes peneiras (A) antes e (B) após a moagem93
- Figura 33 - Alterações morfológicas nos materiais de eucalipto tratados a (A) 220 °C e (B) 300 °C analisados através de microscopia eletrônica (MEVA).....96
- Figura 34 - Alterações morfológicas nos materiais de pinus tratados a (A) 220 °C e (B) 300 °C analisados através de microscopia eletrônica (MEVA)96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da quantidade de resíduos florestais gerados por unidade de área e por árvore e teor de umidade.....	65
Tabela 2 - Rendimento mássico do tratamento térmico dos resíduos de eucalipto e pinus	67
Tabela 3 - Densidade a granel dos resíduos de eucalipto e pinus.....	69
Tabela 4 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha de 16,0 mm	73
Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha de 8,0 mm	73
Tabela 6 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha de 4,0 mm	74
Tabela 7 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha menor que 4,0 mm	74
Tabela 8 - Resultados do tamanho médio dos resíduos de eucalipto e pinus.....	76
Tabela 9 - Poder calorífico superior dos resíduos de eucalipto e pinus	77
Tabela 10 - Índice de combustão, temperaturas máxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima e na temperatura final do teste dos resíduos de eucalipto.....	80

Tabela 11 - Índice de combustão, temperaturas máxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima e na temperatura final do teste dos resíduos de pinus	82
Tabela 12 - Análise imediata dos resíduos de eucalipto.....	85
Tabela 13 - Análise imediata dos resíduos de pinus	86
Tabela 14 - Rendimento mássico do tratamento térmico dos resíduos florestais.....	89
Tabela 15 - Tamanho médio dos resíduos florestais antes e após a moagem.....	93

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos países está buscando ações para que as energias alternativas renováveis tenham participações significativas nas suas matrizes energéticas. A motivação para esta mudança de postura é a necessidade de reduzir o uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética destes países em relação aos países exportadores deste produto. Além disto, a redução no consumo de derivados de petróleo também diminui as emissões de gases do efeito estufa.

Diante deste quadro, a matriz energética mundial, baseada nos recursos energéticos não renováveis, vem sofrendo as conseqüências de profundas mudanças. Com a crise do petróleo em 1973/74 e em 1979/80, cresceu o interesse de um grande número de países no sentido de intensificar o aproveitamento do potencial de outras fontes energéticas, dentre elas o carvão mineral, o gás natural e a madeira, conforme relatam Brito e Cintra (2004).

Cruz e Nogueira (2004), analisando as tecnologias com energias renováveis, já maduras o suficiente para serem empregadas comercialmente, afirmam que somente a biomassa utilizada em processos modernos com alto conteúdo tecnológico possui a flexibilidade de suprir energéticos, tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

No Brasil, em 2009, cerca de 47,3% da Oferta Interna de Energia - OIE tinha origem em fontes renováveis, enquanto que no mundo esta taxa era de 14% e nos países desenvolvidos era de apenas 6%. Desta participação da energia renovável, 32% correspondiam à biomassa (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2010).

A maioria da população mundial usa a madeira para suprir suas necessidades diárias de energia, seja para o aquecimento domiciliar ou para cocção de alimentos, no entanto, esta mesma população sofre a conseqüência de uma crescente escassez deste recurso devido a sua exploração desenfreada. No Brasil, a madeira é usada há muito tempo amplamente como fonte de energia, compreendendo o atendimento de demanda do setor industrial como do setor residencial, neste caso, sendo aplicada na cocção de alimentos e em menor escala para aquecimento doméstico (TEIXEIRA, 2011).

As indústrias do setor florestal geram um volume significativo de resíduos durante as diversas fases operacionais, que vão desde a exploração florestal até o produto final, podendo ser considerados como uma importante fonte de biomassa. Os resíduos gerados durante a colheita florestal são principalmente compostos de galhos, ponteiros, cascas e folhas.

Na exploração florestal utiliza-se quase que exclusivamente o fuste denominado comercial, que vai da base da tora até um diâmetro mínimo pré-estabelecido. Os galhos e os ponteiros das árvores são deixados no campo como resíduos, representando cerca de 20% da madeira existente na floresta (BRITO, 1996). Uma característica fundamental destes resíduos é a sua grande heterogeneidade (composto de diferentes espécies florestais, diferentes localizações na árvore, diversos teores de umidade, etc.), que irá dificultar grandemente a utilização adequada desta biomassa.

Com relação aos processos de conversão da biomassa, o tratamento térmico, quando conduzido à temperaturas entre 150 e 300 °C, proporciona transformações na sua estrutura, com baixa demanda energética, não necessitando do desenvolvimento de técnicas complexas. Em tais condições ocorre a remoção de umidade, de extrativos e de boa parte dos polissacarídeos. Deste processo, resulta um material intermediário entre a biomassa e o carvão, com altos rendimentos energéticos (DOAT, 1985b; FELFLI et al., 2000).

Dentre os processos de tratamento térmico pode-se citar a torrefação, que tem como objetivo concentrar a energia da biomassa em curto tempo, e obter altos rendimentos operando com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, para permitir que os voláteis de maior poder calorífico fiquem retidos no produto sólido denominado biomassa torrefeita ou torrificada (DOAT, 1985b). Existe ainda o processo denominado de retificação térmica ou termorretificação, geralmente conduzido nas temperaturas inferiores àquelas usadas na torrefação (GOHAR; GUYONNET, 1998), em que o calor é aplicado à madeira afetando, sobretudo, as hemiceluloses. Como resultado, tem-se um produto sólido apresentando características diferenciadas, comparativamente ao material original, algumas delas interessantes para aplicações diferenciadas da madeira (alteração de cor, hidrofobicidade, resistência à ação de microorganismos, estabilidade dimensional etc.).

No caso de resíduos florestais, o tratamento térmico poderá conduzir à homogeneização das características químicas e físico-mecânicas do material e, sobretudo, concentrar a energia disponível em um novo produto, com uma perda de massa limitada variando em função da temperatura. Além da maior concentração de energia, o produto final poderá ser mais facilmente fragmentável (maior friabilidade) devido à redução de suas resistências físico-mecânicas, além de apresentar menor higroscopicidade e um baixo teor de umidade final. Dentre outros, tais aspectos poderão garantir maior sucesso na aplicação da biomassa residual da colheita florestal para fins energéticos.

Considerando-se o potencial de oferta de resíduos da colheita florestal, associado ao processo de tratamento térmico para transformação das características desse material, visando a aplicação energética, o presente estudo objetivou:

- a) Tratar termicamente os resíduos florestais em estufa, na presença de oxigênio (140 e 200 °C) e em atmosfera inerte (220, 260 e 300 °C), determinando os rendimentos mássicos dos produtos sólidos obtidos;
- b) Avaliar as características dos materiais originais e termicamente tratados compreendendo: densidade a granel do material, tamanho das partículas, poder calorífico superior, índice de combustão, análise imediata, resistência à moagem (redução granulométrica) e suas características microscópicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa e energia

O uso do fogo como fonte de energia pelo homem deu-se, inicialmente, através da biomassa. Do mesmo modo, a madeira foi por um longo período de tempo a principal fonte energética possibilitando seu uso na cocção de alimentos, siderurgia e cerâmica. A valorização da biomassa se deu com o advento da lenha na siderurgia, no período da Revolução Industrial.

No século XIX, com o avanço da tecnologia a vapor, a biomassa passou a ter papel primordial também na obtenção de energia mecânica, com aplicações nos setores da indústria e transportes. Apesar do início da exploração dos combustíveis fósseis, como o carvão mineral e o petróleo, a lenha continuou desempenhando importante papel energético, principalmente nos países tropicais. No Brasil, foi aproveitada em larga escala, atingindo 40% da produção energética primária.

A partir da crise do petróleo de 1973, a atenção voltou-se para a importância da biomassa como fonte energética, e no mundo todo começaram a ser desenvolvidos programas visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da mesma. A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é muito defendida como uma alternativa importante, devido a sua disponibilidade, ao custo competitivo e por ser uma fonte renovável de energia (SANTOS; GULYURTLU; CABRITA, 2010).

A crescente busca mundial por alternativas fontes renováveis de energia tem levado um número significativo de países a promover alterações na composição de suas matrizes energéticas. Em países como a Alemanha, Áustria, Canadá, Dinamarca, Finlândia e Suécia, a produção de energia a partir de fontes renováveis está sendo incentivada através de subsídios governamentais. A União Européia planeja que até 2020 aproximadamente 20% de sua energia seja produzida através de recursos renováveis (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2011).

O potencial e a importância do Brasil na produção de energia renovável são bastante expressivos. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL em 2010, revelaram que a energia produzida pelo uso de fontes renováveis representa 73,1% da matriz energética nacional. O consumo de energia elétrica deve subir 9,4% em 2011, acompanhando o avanço econômico do país. As projeções para o período de 2012 a 2020 indicam um crescimento médio da demanda de 5,2% a.a. Portanto, há espaço e oportunidade para se produzir energia a partir de biomassa, uma fonte de baixo custo e investimento, ecologicamente adequada e socioeconomicamente correta.

A queima de biomassa é menos poluente porque apesar de provocar liberação de CO₂ para atmosfera, este CO₂ já tinha sido absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, tornando assim, o balanço de emissões de CO₂ nulo. Este ciclo de carbono nulo pode ser repetido indefinidamente, desde que a biomassa seja regenerada nos próximos ciclos e colhida para utilização. A gestão sustentável das fontes de biomassa é de extrema importância para garantir que o ciclo do carbono não seja interrompido.

Conforme Jannuzzi (2003), a utilização de biomassa na geração de energia é de grande interesse para o país especialmente quando direcionado a usos como na geração de eletricidade, produção de vapor e combustíveis para transporte. Segundo o mesmo autor, o mais importante, independente da tecnologia empregada, é a redução do custo da matéria-prima incluindo os custos de coleta e transporte. Há ainda o baixo custo de aquisição, liberação de resíduos menos agressivos ao meio ambiente, menor corrosão dos equipamentos, maior utilização de mão-de-obra e a redução das emissões de poluentes, uma vez que estes compostos apresentam balanço nulo de emissão de CO₂ (GRAUER; KAWANO, 2008).

Para Brasil (2011), a expressiva participação da energia hidráulica e o uso representativo de biomassa na matriz energética brasileira proporcionam indicadores de emissões de CO₂ bem menores do que a média mundial e dos países desenvolvidos. No país, a emissão de 2010 pelo uso de energia ficou em 1,45 tCO₂/tep da OIE, enquanto que nos países da OCDE (Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico, mais conhecida como o clube dos países ricos) esse

indicador ficou em 2,33 tCO₂/tep de OIE (2008), e no mundo ficou em 2,4 tCO₂/tep (2008).

A biomassa é apontada como um complemento mais limpo e seguro, por utilizar fontes como madeira e seus resíduos, bagaço de cana, licor negro (nas indústrias de papel e celulose), capim elefante, biogás e as chamadas florestas energéticas, para geração de energia térmica e termelétrica. A energia oriunda de biomassa tradicional representa hoje aproximadamente 6,5% da matriz elétrica (o que equivale a 7,9 milhões de kW produzidos segundo a ANEEL), podendo representar 14% até 2020.

Os programas de etanol, biodiesel e florestais desenvolvidos no Brasil consagram o país como referência mundial no âmbito da produção de agroenergia (energia produzida a partir de produtos agrícolas, pecuários ou florestais) (ABRAF, 2011).

Alguns fatores potencializam a vocação e aptidão brasileira: a disponibilidade de área cultivável, a alta produtividade nas principais culturas agrícolas (como a soja e a cana-de-açúcar) e florestais (como *Eucalyptus*), a existência de políticas públicas direcionadas ao segmento, como planos de apoio do governo e de instituições de pesquisa, a diversidade edafoclimática, que amplia o leque de espécies aptas ao cultivo de biomassa e o aumento de interesse de investidores nacionais e internacionais em contratos de longo prazo para a produção de biomassa.

Em 2010, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* e *Pinus* no Brasil totalizou 6.510.693 ha, sendo 73,0% correspondente à área de plantios de *Eucalyptus* e 27,0% a plantios de *Pinus*. No período 2005-2010, o crescimento acumulado foi de 23,0%, ou seja, 3,5% ao ano.

Portanto, tendo em vista que a energia é um requisito essencial para o desenvolvimento econômico e social e que previsões indicam que a oferta de petróleo não atenderá a demanda da crescente população mundial, ressalta-se a necessidade de adoção de fontes alternativas de energia, especialmente renováveis. A questão do aquecimento global e das mudanças climáticas também evidencia a necessidade da incorporação, no processo de desenvolvimento, de tecnologias eficientes e modernas de energias renováveis (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003).

2.2 Biomassa florestal e geração de resíduos

A biomassa é um recurso renovável proveniente de matéria orgânica, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada como fonte de energia (SILVA et al., 2004). Possui algumas vantagens tais como: é um recurso renovável; tem baixo custo de aquisição; não emite dióxido de enxofre; as cinzas são menos agressivas ao meio ambiente que as provenientes de combustíveis fósseis; provoca menor corrosão nos equipamentos (caldeiras, fornos); tem menor risco ambiental e suas emissões não contribuem para o efeito estufa (GRAUER; KAWANO, 2008).

Do ponto de vista energético, segundo Vasconcelos et al. (2007), biomassa é o resultado obtido da atividade fisiológica das plantas, que podem se comportar como verdadeiras usinas, podendo assim transformar a energia solar, por meio do processo fotossintético, em energia química. Quando a biomassa é processada de forma eficiente, química ou biologicamente, extrai a energia armazenada nas ligações químicas e a subsequente "energia" produzida combinada com o oxigênio, o carbono é então oxidado para produzir CO₂ e água. Este processo é cíclico, e o CO₂ é então disponível para produzir nova biomassa (McKENDRY, 2002). Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor (ANEEL, 2002).

A biomassa tem diversas origens, podendo ser obtida de vegetais lenhosos e não-lenhosos, de resíduos orgânicos (agrícolas, florestais, urbanos e industriais) e de biofluidos, como óleos vegetais. Estas diversas fontes podem ser abrangidas no aproveitamento energético da biomassa (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

A Portaria Normativa 302/84 do IBDF (atualmente IBAMA) conceituou resíduos florestais como sobras de material, que não o objeto prioritário da atividade, resultante da alteração sofrida pela matéria-prima florestal quando submetida à ação exterior através de processos mecânicos, físicos e/ou químicos. Para Nolasco (2000), o conceito de resíduo florestal é estabelecido como todo e qualquer material resultante da colheita ou do processamento da madeira e/ou outros recursos florestais que permanece sem utilização definitiva ao longo do processo, por limitações tecnológicas e de mercados, sendo descartado durante a produção.

Basicamente, os resíduos florestais podem ser classificados em resíduos do manejo florestal e tratos silviculturais (referentes a desbastes e desramas, geralmente realizados em florestas de *Pinus*, e desbrotas em florestas de *Eucalyptus*), resíduos da colheita florestal (galhos, topos, folhas, tocos, casca e outros resíduos) e resíduos do beneficiamento da madeira (gerados na indústria de base florestal, como cascas, resíduos de serrarias e indústrias de chapas de madeira, licor-negro).

Os resíduos resultantes das operações de colheita florestal geralmente são deixados na floresta, por não possuírem aproveitamento, como galhos e ramos, parte superior da árvore, partes quebradas da árvore, toras que não atingiram dimensões mínimas de uso ou de valor comercial insuficiente que justifique a sua remoção. Infere-se que menos de dois terços de uma árvore são retirados da floresta para a comercialização, ou seja, cerca de 33% da massa de uma árvore são deixados na floresta por ocasião da colheita (FAO, 1990).

Citando-se estudos relacionados ao uso da biomassa florestal, Couto et al. (1984) realizaram a quantificação de resíduos florestais para a produção de energia em povoamento de *Eucalyptus saligna*, constando de folhas, galhos, ponteiro da árvore e árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) abaixo de 6,0 cm. Esses autores observaram que o potencial energético do povoamento estudado foi de 21,3 toneladas equivalentes de óleo combustível por hectare, o que viabilizaria investimentos para o uso da biomassa para fins energéticos.

Uma quantificação dos resíduos resultantes da colheita mecanizada de toras de *Eucalyptus grandis* com diâmetro acima de 6 cm, com “Slingshot” e “Forwarder”, resultou em 16,17 m³/ha de madeira desperdiçada (4,5% do total) (BAUER, 2001).

Uma estimativa realizada na exploração de toras de caixeta (*Tabebuia cassinoides*) com no mínimo 12 cm de diâmetro, no Estado de São Paulo, comprovou que somente 33% da madeira foram aproveitados (NOLASCO, 1997).

2.3 Características da biomassa e a geração de energia

Cortez, Lora e Gómes (2008), expõem que a potencialidade de um combustível - análise se o mesmo é aproveitado em sua total capacidade - pode ser avaliada pelo

conhecimento preliminar de suas propriedades térmicas e químicas fundamentais, sendo estas o potencial calórico, a composição elementar e a composição imediata.

A composição química elementar consiste no teor em porcentagem de massa dos elementos essenciais que compõe a biomassa: carbono (C); hidrogênio (H); enxofre (S); oxigênio (O); nitrogênio (N); umidade (U) e material residual - cinzas - (A). A composição química imediata corresponde ao conteúdo porcentual em massa de carbono fixo (CF), voláteis (MV), umidade (U) e cinzas (CZ). O teor de umidade da amostra deve ser determinado pela secagem da mesma, anteriormente às análises de composição elementar e imediata (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008).

A utilização racional da biomassa, conforme observam Couto et al. (2004), não tem sido totalmente eficiente devido a sua heterogeneidade, tanto no aspecto físico (ex: forma e umidade) quanto no aspecto químico (ex: composição molecular, teor em matérias minerais, etc.). Os autores afirmam ainda que, os tratamentos adicionais como a secagem, a uniformização granulométrica e até mesmo a densificação, têm sido recomendados para contornar o problema. Em relação à biomassa florestal, os autores consideram ainda que as propriedades físicas mais importantes, que se encontram diretamente relacionadas com a sua utilização para fins energéticos, são o conteúdo de umidade residual (base seca) e a sua densidade energética. A baixa densidade energética da biomassa sólida, em comparação com o petróleo e o carvão mineral, resulta em custos elevados de transporte e armazenamento. Por outro lado, Brito e Barrichelo (1978), ampliam tal conceituação indicando o poder calorífico, o teor de umidade, a densidade e a análise imediata como as propriedades mais importantes da madeira para sua utilização como combustível.

A energia gerada pela biomassa florestal depende do seu poder calorífico e do seu conteúdo de umidade. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa do combustível. No Sistema Internacional de Unidades (SI), o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilograma. Porém, a unidade mais usada para combustíveis sólidos é calorias por grama ou quilocalorias por quilograma, e para combustíveis gasosos é calorias por metro cúbico (INCE, 1977; QUIRINO, 2002).

Esta energia pode ser expressa como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). O PCS é obtido a partir do combustível seco, enquanto que o PCI considera o conteúdo de água de constituição do combustível e o calor perdido com a vaporização da água. Portanto, o PCI retrata melhor a qualidade de um combustível (INCE, 1977; QUIRINO, 2002).

Pérez et al. (2008) destacam que a energia contida em um combustível será maior quanto maior for o seu poder calorífico, mostrando assim a importância do conhecimento dessa propriedade para avaliação de um combustível como insumo energético. O poder calorífico depende, principalmente, da composição química do combustível (INCE, 1977). Altos conteúdos de carbono e hidrogênio significam alto poder calorífico, enquanto oxigênio apresenta efeito contrário (PEREIRA JR, 2001).

O poder calorífico da madeira relaciona-se negativamente com o seu teor de umidade. A umidade da madeira torna-se importante por duas razões básicas. A primeira é que ele varia dentro de faixa ampla de valores em função de espécies, clima, armazenamento etc., tornando o controle do processo de combustão mais difícil. A segunda razão é que a água tem um poder calorífico negativo, isto é, necessita de calor para evaporar (BRITO; BARRICHELO, 1979; VALE et al., 2000; PEREIRA et al., 2000). Para que ocorra uma boa combustão, a madeira deve ser utilizada com teores de umidade abaixo de 25%. Teores superiores a 25%, além de diminuir a quantidade de calor, reduzem as temperaturas da câmara de queima e dos gases de escape (FARINHAQUE, 1981; PEREIRA et al., 2000).

Quanto ao PCS, tem-se verificado valores para madeira de 3500 a 5000 kcal/kg (BRITO; BARRICHELO, 1982; NURMI, 1992, 1995; NOGUEIRA; LORA, 2003; TEIXEIRA; LORA, 2004; QUIRINO et al., 2004). Para biomassa recém colhida, foram observados valores médios de PCS de 4839 kcal/kg para madeira, 5008 kcal/kg para acículas e 4925 kcal/kg para casca (THÖRNQVIST; GUSTAFSSON (1983) apud THÖRNQVIST, 1985). Para resíduos florestais de *Quercus*, Thörnqvist (1986) obteve valores entre 4600 a 5000 kcal/kg.

A madeira de espécies coníferas, que contém mais extrativos do que as folhosas, geralmente apresenta PCS entre 4700 e 6600 kcal/kg, enquanto que a madeira de folhosas possui entre 4400 e 5800 kcal/kg (INCE, 1977). Estudos indicam

que a resina presente em determinadas espécies tem poder calorífico médio de 9460 kcal/kg. Assim, espécies com altos teores de resina (coníferas) apresentam maior poder calorífico do que espécies com baixos teores de resina (folhosas) (BRITO; BARRICHELO, 1979).

Porém, a umidade é talvez o fator que exerce maior influência sobre o uso da madeira para energia. A presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água, ou seja, antes de ocorrer a combustão, a água precisa evaporar. Além disso, se o conteúdo de água for muito variável, pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema (BRITO, 1986). Em estudo para determinar a época ideal de colheita para a utilização da biomassa florestal de pinus e eucalipto na geração de energia, Brand e Muniz (2010) constataram que o uso da biomassa nas condições de recém colhida não é recomendado em função dos elevados teores de umidade (próximo de 50%) e baixo poder calorífico líquido (inferior a 1900 kcal/kg).

Além da umidade, a biomassa florestal também pode ser extremamente variável em relação às características físicas, tais como tamanho e forma das partículas e conteúdo de contaminantes não combustíveis, que influenciam na conversão energética. Os sistemas de conversão são ajustados para operar com um determinado tempo de retenção para cada tipo de combustível e, se as características do material não forem uniformes, a eficiência de conversão do sistema diminui (POTTIE; GUIMIER, 1985).

No que se refere à qualidade de combustão, Quirino e Brito (1991) avaliaram o desempenho de briquetes, de diferentes procedências, durante a combustão num dispositivo de teste que possibilitou a verificação da temperatura e da massa consumida dos respectivos briquetes, durante a combustão. Isso permitiu a elaboração de curvas de temperatura x tempo, massa x tempo e massa x temperatura. A partir de valores extraídos de pontos dessas curvas foi elaborado um índice denominado “índice de combustão”. Os autores concluíram que este índice é um bom indicativo do comportamento de um briquete durante a combustão e que pode ser adotado para classificar e comparar a qualidade de diferentes briquetes.

O tamanho e a forma das partículas do combustível afetam a taxa de conversão energética durante a queima de duas maneiras. Primeiro, partículas com tamanho e forma diferentes possuem diferentes superfícies de área por unidade de volume ou peso de combustível. Uma vez que as reações químicas ocorrem na superfície das partículas, a desuniformidade afeta a taxa de queima do material. Segundo, o tamanho e a forma das partículas do combustível determinam o fator de volume sólido, ou seja, a quantidade de espaços vazios por unidade de volume ou peso do material. Assim, a quantidade de oxigênio presente nestes espaços vazios também afeta a taxa de queima do combustível (POTTIE; GUIMIER, 1985).

Diante do exposto, observa-se que a biomassa dificilmente se encontra nas condições adequadas de uso energético; trata-se de material muito heterogêneo, com alto teor de umidade, e baixa concentração de carbono. Devido a estas características a biomassa demanda tratamentos que melhorem suas propriedades energéticas e a padronizem como um combustível.

Neste sentido, diferentes técnicas têm sido estudadas ou usadas com vistas à modificação de algumas características da madeira, sendo o tratamento térmico conhecido como um dos mais antigos, fácil e viável economicamente, com melhoras no que se refere à capacidade de repelência à água, estabilidade dimensional e resistência biológica da madeira.

2.4 Tratamento térmico da madeira

O calor é um dos principais recursos utilizados no processamento industrial da madeira. Em função do direcionamento que possa ser dado à sua aplicação, diferentes possibilidades de rendimento e qualidade de produtos podem ser alcançados.

Assim ocorre, por exemplo, no chamado processo de carbonização, onde através da ação do calor objetiva-se principalmente a obtenção do carvão vegetal. Outro exemplo é a destilação seca, a qual destina-se além do carvão vegetal, da recuperação dos gases voláteis eliminados durante o processo. Na gaseificação, pretende-se transformar a madeira, integralmente, em produtos gasosos. A combustão, por sua vez, relaciona-se à transformação total da madeira em energia.

A ação do calor na madeira pode provocar diferentes níveis de transformações em sua estrutura, as quais estão associadas ao fenômeno da pirólise. Esta pode ser definida como a degradação da madeira, na qual a ação do calor ocorre na ausência de agentes oxidantes ou de catalisadores e, portanto, sem combustão, conforme propõe Brito (1992).

A perda de massa da madeira tem sido usada como um critério para a identificação de fases da pirólise. O critério baseia-se na existência de fortes correlações entre as reações químicas que ocorrem durante a elevação da temperatura, e os níveis de perda de massa observados durante o processo. Guedira (1988) e Vovelle e Mellottee (1982) classificaram a redução de massa da madeira, durante o processo de pirólise, em cinco diferentes fases. A primeira fase situa-se entre a temperatura ambiente e 100 °C, e corresponde à saída da chamada água livre e água higroscópica da madeira, que permanecia retida no lúmen e parede das células. A segunda fase ocorre entre 100 e 250 °C, e também está ligada à eliminação de água. Uma parte desta água ainda é chamada higroscópica, retida pelas paredes celulares e considerada como estando adsorvida junto às hidroxilas das cadeias de polissacarídeos e da lignina. Outra parte da água é chamada água de constituição, cuja eliminação é acompanhada por uma degradação irreversível da madeira, sobretudo de seus grupos hidroxílicos. A terceira fase situa-se entre 250 e 330 °C, na qual ocorre, em geral, a destruição da hemicelulose. A quarta fase situa-se entre 330 e 370 °C, em que se supõe ocorrer a destruição da celulose. A quinta fase manifesta-se à temperaturas acima de 370 °C, quando o carvão vegetal é produzido, estando fortemente ligada ao início da degradação da lignina.

A utilização racional da biomassa, conforme observam Couto et al. (2004), não tem sido totalmente eficiente devido a sua heterogeneidade, tanto no aspecto físico quanto no aspecto químico. Os autores afirmam ainda que os tratamentos adicionais como a secagem, a uniformização granulométrica e até mesmo a densificação têm sido recomendados para contornar o problema. Diante deste quadro, e em se considerando a madeira, surge a oportunidade para adoção de processos de tratamento térmico, para os quais já existem referências que indicam a ocorrência de mudanças nas

características desse material, o que conduz à previsão de se poder obter resultados positivos em relação ao que se exige para usos energéticos.

A madeira tratada termicamente pode apresentar melhoria da sua resistência à decomposição, maior estabilidade dimensional, enquanto que, no caso das resistências físico-mecânicas, dependendo das faixas de temperatura alcançadas, estas podem sofrer de moderadas até drásticas reduções (KAMDEM; PIZZI; JERMANNAUD, 2002; SILVA; GARCIA; BRITO, 2004). A modificação química de componentes da madeira, ocorrendo durante o tratamento térmico é, sobretudo, responsável por estas novas propriedades (TJEERDSMA et al., 1998; SIVONEN et al., 2002; HAKKOU et al., 2005 apud NGUILA INARI; PETRISSANS; GERARDIN, 2007; BRITO et al., 2008). Além disso, é bem sabido que tratamentos térmicos resultam em mudanças na estabilidade dimensional associada com a diminuição da higroscopicidade e do equilíbrio do teor de umidade da madeira (KAMDEM; PIZZI; JERMANNAUD, 2002; PETRISSANS et al., 2003).

Nos anos 80, em função da crise de petróleo, que demandava materiais energéticos alternativos, a pirólise da madeira passou por uma nova e intensa fase de estudos a nível mundial. Uma das decorrências desse fato foi o surgimento do chamado processo de torrefação da madeira.

A torrefação tem por finalidade a obtenção de um produto sólido da pirólise exotérmica e parcialmente controlada da madeira, na faixa de temperatura entre 200 e 280 °C, apresentando: elevado conteúdo energético; hidrofobia - praticamente não absorve umidade; ótima durabilidade e friabilidade (VERGNET, 1988).

A torrefação é uma fase inicial da pirólise, portanto ocorre em ausência parcial ou total de agentes oxidantes tal como o ar. O fator que diferencia a torrefação da carbonização é o caráter endotérmico das reações globais que ocorrem em temperaturas inferiores a 300 °C, acima desta as reações tornam-se exotérmicas e formam o carvão. Assim, a biomassa torrificada é um produto intermediário entre a biomassa seca e o carvão. A perda de massa pode atingir até 30% sob a forma de emissão de gases (vapor d'água e compostos voláteis) com uma perda de apenas 10% do conteúdo energético inicial.

Um processo derivado da torrefação surgiu logo a seguir, também com a finalidade da obtenção de um produto sólido a partir da pirólise da madeira, mas sem o forte apelo do seu uso energético. O processo é então denominado de retificação térmica ou termorretificação, geralmente conduzido nas temperaturas inferiores às usadas na torrefação (GOHAR; GUYONNET, 1998).

A termorretificação é um processo em que o calor é aplicado à madeira em temperaturas inferiores às que provocam o início da degradação da maioria de seus componentes químicos fundamentais. Conforme Guedira (1988) e Vovelle e Mellottee (1982), tais temperaturas estariam entre 100 e 250 °C. O resultado seria a obtenção de um produto sólido apresentando características diferenciadas, comparativamente à sua madeira original, algumas delas podendo tornar-se interessantes para aplicações diferenciadas da madeira/do produto final. É neste contexto que se apresenta a madeira termorretificada.

As informações oferecidas a seguir têm como base os trabalhos de Vergnet (1988), Gohar e Guyonnet (1998), Kaila (1999), Duchez e Guyonnet (2002). Neles podem ser encontradas referências para uma série de possibilidades de uso para a madeira termorretificada, tais como revestimentos, instalações de paredes à prova de som, assoalhos, terraços, móveis para jardim, batentes de porta e janela, parquet, móveis residenciais, decorações, e inclusive na fabricação de instrumentos musicais, em que a estabilidade garante propriedades acústicas consistentes. Transformada em fragmentos, pode ainda ser usada na manufatura de materiais compostos em associação com vidro, fibras de vidro, materiais colantes, tais como gesso e cimento. Pode ainda substituir o tratamento preservante de espécies cuja impregnação com compostos químicos é proibida de acordo com a natureza do uso final da madeira, por exemplo, no caso das embalagens para alimentos. As informações indicam ainda que o processo pode ser desenvolvido em escala industrial e que os custos têm se mostrado compatíveis com as possibilidades de mercado.

De acordo com Esteves e Pereira (2009), existem cinco principais tratamentos térmicos comerciais na linha da termorretificação, sendo um na Finlândia (Thermowood), um na Holanda (Plato wood), um na Alemanha (OHT-Oil Heat Treatment), e dois na França (Bois Perdue e Rectification). Novos processos de

tratamento térmico também estão emergindo em outros países, como a Dinamarca (WTT) e Áustria (Huber Holz). Alguns destes processos estão em instalação, e outros já estão em plena produção. Várias espécies de madeira são usadas, com condições de processo diferentes, dependendo da espécie e do uso final do produto. Todos os processos utilizam madeira serrada e temperaturas de tratamento entre 160 e 260 °C, mas diferem em termos de condições de processo, como a presença de um gás de proteção tais como nitrogênio ou vapor, processos úmido ou seco, uso de óleos, etc. (MILITZ, 2002).

Rousset (2004) ressalta que a Finlândia, junto à França, são os países mais avançados nos processos industriais de tratamento térmico. Contudo, há que se ressaltar que a maioria destes processos é de temperaturas mais baixas e normalmente não visa um uso energético da madeira tratada. Conforme Esteves e Pereira (2009), nestes países, a madeira tratada por esses processos tem uma larga aplicação para usos ao ar livre, decks, móveis para jardim, molduras de janelas, bem como para uso interno, como na confecção de armários para cozinhas, parquet, painéis decorativos e, principalmente, para o interior de saunas.

No Brasil, as primeiras referências sobre o emprego do tratamento térmico ligado a termorreificação de madeiras foram apresentadas por Brito (1993). O autor obteve resultados específicos sobre a influência da temperatura do processo na redução da massa, alteração na densidade, composição química e capacidade de retração volumétrica de *Eucalyptus saligna*. Em relação ao pioneirismo de trabalhos na área do tratamento térmico de madeiras de eucalipto e pinus, deve-se ainda citar Pincelli, Brito e Corrente (2002), que avaliaram a termorreificação sobre a colagem nas duas madeiras e concluíram que tal processo reduziu os valores de resistência ao cisalhamento da madeira, não havendo, porém, efeito sobre tal resistência em se tratando da linha de colagem, ou seja, na interação madeira/adesivo.

2.4.1 Tratamento térmico e características químicas da madeira

A maioria dos estudos estabelece claramente que 95% das reações de degradação térmica da madeira acontecem entre 200 e 400 °C. A compreensão destes

fenômenos principia na identificação dos caminhos reacionais e na determinação dos parâmetros cinéticos envolvidos na degradação térmica dos constituintes químicos da madeira. As formulações capazes de descrever de modo detalhado a decomposição química da celulose, das hemiceluloses e da lignina são numerosas e variadas (AGRAWAL, 1984; ORFÃO; ANTUNES; FIGUEIREDO, 1999; TANOUE et al., 2007). Em geral, as hemiceluloses são os polímeros mais reativos, seguidos da lignina e da celulose (INARI; PETRISSANS; GERARDIN, 2007; CHEN; KUO, 2010).

A madeira é um material composto complexo, que consiste em celulose (40 a 45%), hemiceluloses (20 a 25%), lignina (20 a 30%), e compostos de baixa massa molecular como voláteis e extrativos não-voláteis (3 a 5%) (WIGBERG; MAUNU, 2004). A celulose pode ser caracterizada como um polímero linear de alto peso molecular composto de unidades anidro-D-gluco-piranoose ligadas por ligações glicosídicas β -D-1-4. As hemiceluloses, que são o segundo principal componente depois da celulose, são compostas de vários monômeros de açúcar como a glicose, manose, galactose, xilose, e arabinose que são ligados por várias pontes e como resultado forma uma estrutura polimérica ramificada. A lignina, o terceiro principal componente químico em madeira, é um polímero aromático formado por unidades de fenil propano ligados principalmente por ligações éter aril (ESTEVES; GRACA; PEREIRA, 2008).

A pirólise da celulose é geralmente caracterizada por duas reações correspondendo respectivamente à desidratação e à despolimerização. O primeiro caminho reacional se produz entre 250 e 280 °C resultando na formação de um resíduo sólido intermediário (65 a 70%) e de produtos voláteis (30 a 35%) enquanto que uma temperatura mais elevada (> 280 °C) favorecerá a despolimerização da celulose em levoglucosana (SHAFIZADEH; BRADBURY, 1979).

A relativa estabilidade térmica da celulose se explica pela característica estrutural das microfibrilas. A perda de certas propriedades mecânicas da madeira tratada termicamente é resultado simultâneo da ruptura das ligações glucosídicas entre os monômeros de glucose e das ligações de hidrogênio inter e intramoleculares (EMSLEY; STEVENS, 1994). Essa fragilidade é acentuada pela presença de açúcares como a galactose, a manose e a xilose nas fibras (NEVELL; ZERONIAN, 1985). Sobre a cristalinidade da celulose, de maneira geral, o tratamento térmico conduz a um aumento

sensível desta. A razão mais provável seria uma mudança do estado cristalino com a cristalização das zonas amorfas (BHUIYAN; HIRAI, 2005).

As hemiceluloses são não-cristalinas, altamente reativas e relativamente fáceis de serem hidrolisadas por temperaturas entre 200 e 230 °C, mesmo sem a presença de ácido acético que catalisa a cisão dos carboidratos e das ligninas (TJEERDSMA et al., 2002). A hidrólise das hemiceluloses é igualmente afetada pela pressão durante a degradação térmica (BOONSTRA; TJEERDSMA; GROENEVELD, 1998). De todas as moléculas da madeira, estas moléculas são as mais instáveis termicamente. A reatividade delas é função da estrutura molecular e se elas pertencem à família das folhosas ou das coníferas. As xilanas (folhosas) são mais reativas e sensíveis às reações de degradação e de desidratação entre 200 e 260 °C (KOUFOPANOS; LUCCHESI; MASCHIO, 1989; WINDEISEN; STROBEL; WEGENER, 2007). As hemiceluloses são as principais fontes de produtos voláteis (essencialmente os furfurais e o acetaldeído) e desempenham um papel importante nas reações de iniciação e de propagação da pirólise. Os diferentes tipos de hemiceluloses não têm o mesmo comportamento em relação à temperatura de tratamento, a união de diferentes técnicas analíticas (termogravimetria associada à espectrometria de massa, espectrometria infravermelho e difração de raios X) permite explicar uma parte das reações observadas (AVAT, 1993).

O estudo da estrutura das ligninas é dificultado pelo baixo conhecimento das relações entre este polímero e os outros constituintes da parede secundária celular. A determinação da taxa de lignina pelo método Klason revela que estes polímeros são mais estáveis que os polissacarídeos submetidos aos tratamentos térmicos prolongados realizados sob atmosfera inerte e temperaturas elevadas (220, 250 e 280 °C) (ROUSSET et al., 2009). Como observado por Windeisen, Strobel e Wegener (2007), dos três principais constituintes da madeira, a lignina é a que começa a se degradar desde baixas temperaturas (< 200 °C). A esta temperatura somente as reações de condensação estão presentes e não uma degradação real, que não intervirá a menos de 400 °C (GARDNER; SCHULTZ; MCGINNIS, 1985; SIVONEN et al., 2002; INARI; PETRISSANS; GERARDIN, 2007).

Durante a torrefação vários produtos procedentes da degradação dos compostos da madeira são formados. A proporção de cada um está fortemente ligada às condições de operação (temperatura e tempo) assim como às propriedades da biomassa (FERRO et al., 2004; ROUSSET et al., 2011). Estes produtos estão divididos em três grupos: sólidos, condensáveis (líquidos) e não-condensáveis (gases).

2.4.2 Tratamento térmico e características físicas da madeira

As formas mais usuais de se avaliar o comportamento da madeira em função da temperatura e do tempo de tratamento térmico incluem a Análise Termogravimétrica (ATG), que evidencia a perda de massa do material, a Análise Dinâmica Mecânica (DMA) que se interessa pelas propriedades mecânicas do material e a Calorimetria Diferencial por Varredura (DSC) que mede a energia das reações.

A importância da relação tempo/temperatura sobre as propriedades físicas da madeira tratada (estabilização dimensional, perda de resistência e perda de resiliência) é relatada na literatura. Li et al. (2011), em estudo realizado sobre o efeito do tratamento térmico em algumas propriedades físicas de *Pseudotsuga menziesii* (“Douglas fir”), constataram que a temperatura tem uma influência maior do que o tempo sobre tais propriedades.

A análise termogravimétrica de micro-partículas de *Fagus sp* sob atmosfera inerte, mostrou que a perda de massa pode atingir 45% a 265 °C e a cinética de degradação não atinge seu patamar, mesmo após 5 horas de tratamento, contrariamente aos resultados obtidos por Prins, Ptasinski e Janssen (2006), com *Salix sp*, que mostraram uma estabilização da perda de massa ao início de 2 horas de tratamento a 300 °C. Essas observações demonstram a dificuldade em definir os parâmetros ótimos.

Em estudo da torrefação por espectrometria de massa Nimlos et al. (2003), mostraram que a perda de massa seria, sobretudo, função da temperatura e menos do tempo de residência. Outro estudo por espectrometria do infra-vermelho próximo foi realizado para distinguir as noções de homogeneidade e heterogeneidade dentro de uma peça de madeira (ROUSSET, 2004). Foi mostrado que além das modificações

químicas da madeira torrada serem função da relação tempo/temperatura, estas modificações podem ser idênticas por tratamentos diferentes: 200 °C/8 horas e 225 °C/1 hora. Bergman et al. (2004), observaram que um tratamento com *Salix sp* a 250 °C durante 30 minutos era equivalente a um tratamento a 264 °C durante oito minutos.

Qualquer que seja o tratamento térmico, a água é um obstáculo à valorização energética da biomassa. Sua extração requer muita energia. As modificações químicas que acontecem durante o tratamento térmico têm por consequência uma nítida diminuição da higroscopicidade da madeira. Esta diminuição ocorre principalmente pela alteração das hemiceluloses e mais particularmente por uma modificação da disponibilidade e/ou acessibilidade dos grupos hidroxilas livres, que têm um papel importante na absorção de água (TJEERDSMA et al., 1998). A histerese entre as curvas de absorção e perda não são influenciadas pelo tratamento térmico. A madeira naturalmente hidrófila, após tratamento térmico torna-se hidrófoba (HAKKOU et al., 2006; PÉTRISSANS et al., 2003). Esta mudança de comportamento acontece com temperaturas de tratamento compreendidas entre 130 e 160 °C e, portanto bem antes de todas as degradações térmicas. Então o caráter hidrofóbico não é causado pela degradação dos polímeros da madeira, mas pelo re-arranjo das redes poliméricas da lignina. Baumberger, Dole e Lapierre (2002), mostraram que uma redistribuição das ligações intramoleculares, essencialmente baseadas em um aumento da frequência das ligações C-C e uma diminuição das ligações éter, alvo dos ataques físico-químicos ou biológicos, conduziria a uma rede de ligninas mais resistentes, verdadeira barreira física à água.

As propriedades de difusão e permeabilidade são importantes, pois elas controlam as transferências de gás e de vapor d'água. Rousset, Perré e Girard (2004), observaram que a 200 °C há uma diminuição dos fenômenos de difusão, ao contrário da permeabilidade que é ligada à morfologia do material e não é modificada. A degradação química sofrida pela madeira durante uma torrefação provoca re-arranjos moleculares. Estes eventos podem causar a degradação das membranas, desempenhando um papel importante nos fenômenos de difusão do vapor d'água, contrariamente a Avat (1993), que atribui o essencial dos fenômenos de difusão na madeira torrificada às modificações químicas.

A anisotropia da madeira, sua densidade e seu teor de umidade são fatores que influenciam as propriedades mecânicas. Na maioria dos casos, os tratamentos a alta temperatura fragilizam a madeira.

A redução das propriedades mecânicas depende das espécies e das condições operacionais do tratamento térmico. Mouras et al. (2002), mostraram que para os tratamentos térmicos à baixas temperaturas e tempo de reação curto, as propriedades mecânicas da madeira são pouco alteradas. Segundo Bekhta e Niemz (2003), a resistência à flexão da madeira de coníferas (*Picea spp.*) diminuiu pela metade a partir de 200 °C, enquanto que o módulo de elasticidade (MOE) foi pouco afetado (4% a 9% de redução). Resultados similares foram reportados para uma folhosa (*Betula papyrifera*) aquecida a 220-230 °C (PONCSAK et al., 2006). No entanto, há outros estudos que demonstram aumento do MOR e MOE, como o aumento do MOE da madeira de *Eucalyptus sp* observado por Santos (2000) ou o aumento de 6% para o MOR e 30% para o MOE, relatados por Shi, Kocafe e Zhang (2007). A dispersão dos resultados pode ser explicada por uma forte dependência das propriedades mecânicas com a umidade do material e das condições operacionais de medição (BORREGA; KARENLAMPIL, 2007).

A maior parte dos autores concorda com uma diminuição significativa da friabilidade da madeira torrada, essencialmente para temperaturas superiores a 250 °C (ARCATE, 2002; KUBOJIMA; OKANO; OHTA, 2000). A friabilidade é uma propriedade mecânica que se caracteriza por uma ruptura repentina da fibra. Apesar dessa propriedade ter sido identificada há muito tempo (KOEHLER, 1933), não existe ainda um método capaz de medi-la diretamente.

Phuong, Shida e Saito (2007), mediram o efeito do tratamento térmico sobre a friabilidade de *Styrax tonkinensis* (folhosa). As amostras foram tratadas a 160, 180 e 200 °C em 2, 4, 8 e 12 horas. Os resultados mostraram uma forte variação da flexão estática. A região elástica é bem distinta entre os quatro ensaios. Nas condições mais severas de tratamento (200 °C por 12 horas) pôde-se observar um aumento de quase 60% da friabilidade da madeira torrificada. Este valor é quatro vezes maior que o valor obtido para a madeira não tratada.

No caso dos autores Yildiz, Gezer e Yildiz (2006), os mesmos observaram uma baixa significativa da resistência à compressão da madeira de *Picea orientalis* quando tratada a temperaturas superiores a 150 °C. A diminuição da resistência à compressão está diretamente ligada ao aumento do tempo e da temperatura do tratamento térmico, sendo a temperatura a mais influente. As amostras de madeira tratada a 200 °C por 6 e 10 horas apresentaram uma diminuição da resistência de 39,1% e 32,4%, respectivamente. Esta perda de resistência mecânica é causada pela passagem de um comportamento visco-elástico a um comportamento frágil, quebradiço.

Arias et al. (2008) estudaram o impacto da torrefação sobre a cominuição da madeira de eucalipto sob tratamentos a 240, 260 e 280 °C em 0, 1/4, 1/2, 1, 2 e 3 horas. Este estudo foi realizado com amostras de dimensões inferiores a 5 mm. Após a moagem, as amostras foram peneiradas (4 frações) de modo a avaliar a distribuição granulométrica. Os resultados mostram que é difícil reduzir o tamanho de partículas não tratadas, pois somente 29% passaram através da peneira de 425 µm. A torrefação melhorou significativamente o potencial de cominuição das amostras tratadas. Para efeito de comparação, no tratamento a 240 °C por 1 hora, 48% das partículas torrificadas passaram pela mesma peneira e a 280 °C por 3 horas, o montante foi de 66%.

No contexto energético Ferro et al. (2004), constataram que a porcentagem de carbono aumenta com o aumento da temperatura, enquanto que as taxas de hidrogênio e oxigênio diminuem. A perda destes elementos está ligada à formação de água, monóxido e dióxido de carbono. A principal consequência é o aumento do poder calorífico em função do enriquecimento em carbono fixo, que fica entre 28 e 30%. Então, o aumento do poder calorífico superior (PCS) em função do tratamento térmico, que variou entre 18 MJ/kg e 25,68 MJ/kg, foi determinado por diversos autores (ZANZI et al., 2004; BERGMAN; KIEL, 2005; FELFLI; LUENGO, 2005; PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006; LUENGO; FELFLI; BEZZON, 2008; BRIDGEMAN et al., 2008; SADAKA; NEGI, 2009; PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010).

Pierre et al. (2011), estudando a influência da torrefação sobre algumas propriedades de *Pinus pinaster* e *Quercus robur*, observaram nas análises energéticas que o teor de carbono fixo e maior valor de aquecimento aumentaram, para ambas as

espécies, enquanto que o teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento da temperatura do tratamento (efeitos acumulados da temperatura e tempo).

Dependendo da severidade das condições de torrefação, o material tratado pode conter até 98% do conteúdo energético original em uma base de massa (PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010). Prins, Ptasinski e Janssen (2006), observaram para as condições de tratamento a 250 °C (30 minutos) e 300 °C (10 minutos), que 95% e 79%, respectivamente, do conteúdo energético inicial permanecem no produto sólido final considerando-se o balanço energético do processo de torrefação. Jingge e John (2001), também observaram em estudo, uma eficiência energética de 84%.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

O planejamento foi elaborado de forma a prever o uso de resíduos gerados durante a colheita de madeira realizada em plantações florestais da empresa Duratex (Duraflora S.A.), localizadas na região de Lençóis Paulista - SP. Para o estudo em questão foram utilizadas as espécies de *Eucalyptus grandis*, segunda rotação, com 7 anos de idade e de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com 11 anos de idade.

3.2 Métodos

Os métodos aplicados foram englobados na seqüência conforme a Figura 1.

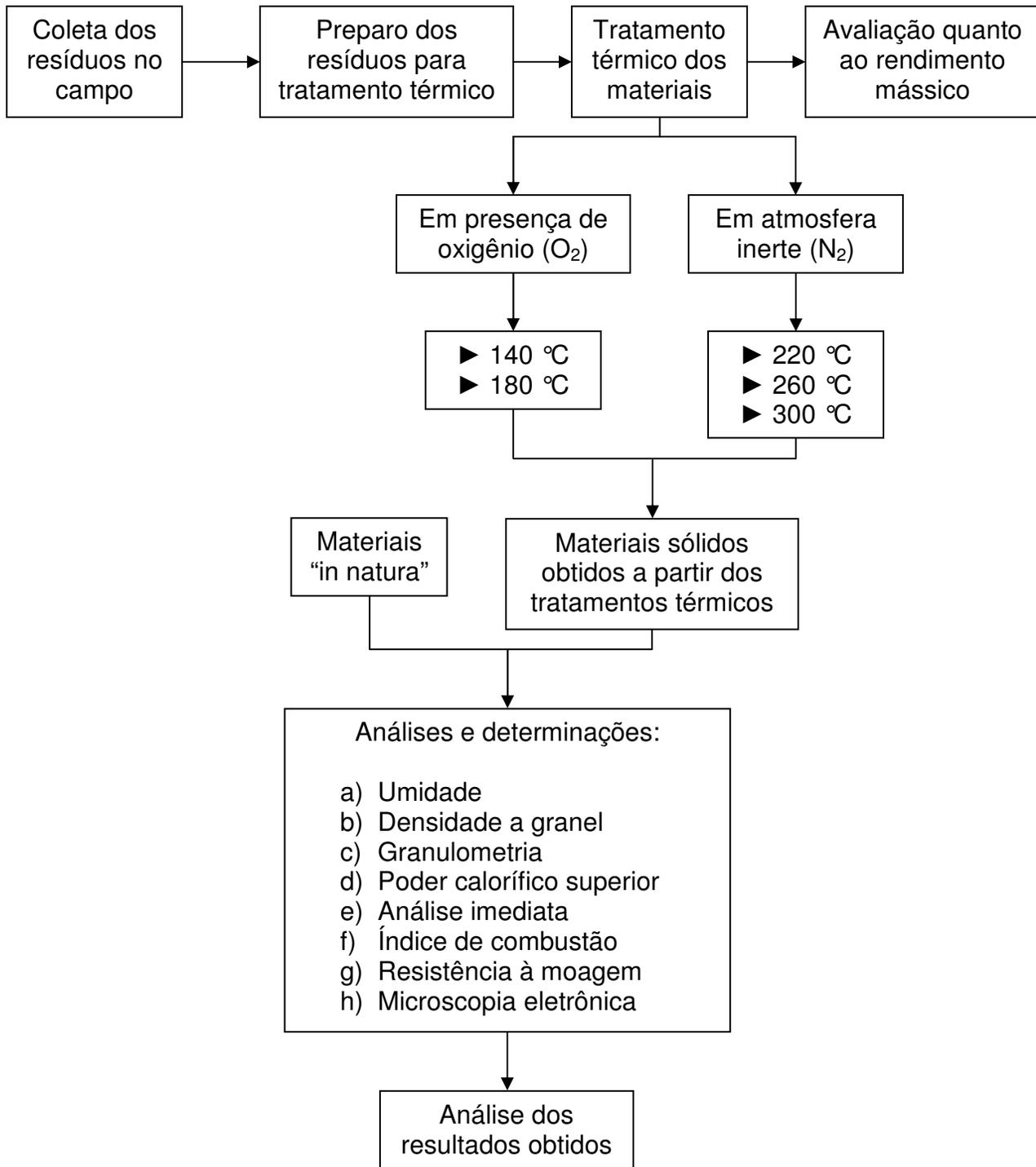


Figura 1 - Sequência do estudo

3.3 Coleta do material no campo

Nesta etapa foram respeitados todos os procedimentos regulares de colheita florestal da empresa, compreendendo equipamentos, mão-de-obra e tempos de processos. Desse modo, não foi executada nenhuma interferência operacional na colheita, exceto o fato dos resíduos terem sido conduzidos para os estudos, ao invés do destino habitual para energia.

A obtenção de resíduos foi executada após a empresa ter retirado a madeira para o seu abastecimento de matéria-prima visando a produção industrial de MDF e chapa de fibra, compreendendo, para o caso do eucalipto, as seguintes etapas:

- a) Derrubada das árvores com o uso de “Feller Buncher”;
- b) Colheita da madeira com o uso do Processador;
- c) Baldeio de toras com o uso do “Forwarder”.

Regularmente, a empresa somente faz a coleta de resíduos do campo decorridos entre 30 a 60 dias após o início do corte de madeira para abastecimento industrial. No caso, a idéia é a de se oferecer um tempo para a redução de umidade do material mediante sua secagem natural no campo, além de permitir que os materiais mais finos (pequenos galhos, folhas) possam cair, no sentido de, pelo menos parcialmente, uma parte dos nutrientes presentes na copa possa ser retornado ao solo. Na concepção de se manter os procedimentos regulares da empresa, os resíduos foram coletados somente após se considerar tal etapa vencida, ou seja, 60 dias após a retirada da madeira.

No talhão escolhido para estudo, numa área de 31,9 hectares (espaçamento de 3,0 x 2,0 m), foram demarcadas, aleatoriamente, 5 parcelas nas dimensões de 24,0 x 8,3 m (200 m²), eliminando-se o efeito de borda.

Com relação ao pinus, o sistema de colheita de madeira adotado foi:

- a) Derrubada e processamento das árvores e madeira com o uso do “Harvester”;
- b) Baldeio de toras com o uso do “Forwarder”.

Antes de serem coletados, foram respeitadas as mesmas condições de permanência dos resíduos no campo observadas para o eucalipto. No caso específico, o tempo de permanência foi de 35 dias.

O talhão de pinus previamente escolhido correspondeu a uma área de 50 hectares (espaçamento de 3,0 x 1,6 m), onde foram selecionadas, aleatoriamente, 4 parcelas nas dimensões de 24,0 x 4,2 m (100 m²), eliminando-se também o efeito de borda. As 4 parcelas de 100 m² adotadas para o pinus, e não as 5 parcelas de 200 m² como do eucalipto, foi devido ao grande volume de resíduos gerado no campo, dificultando assim, o manuseio e transporte dos mesmos.

Tanto os resíduos de eucalipto quanto de pinus foram coletados manualmente, compreendendo, primordialmente, ponteiros, galhos, folhas (eucalipto), acículas (pinus) e cascas soltas (Figura 2). Para facilitar o transporte devido ao grande volume de material obtido, os mesmos foram acondicionados em telas de proteção do tipo sombrite.

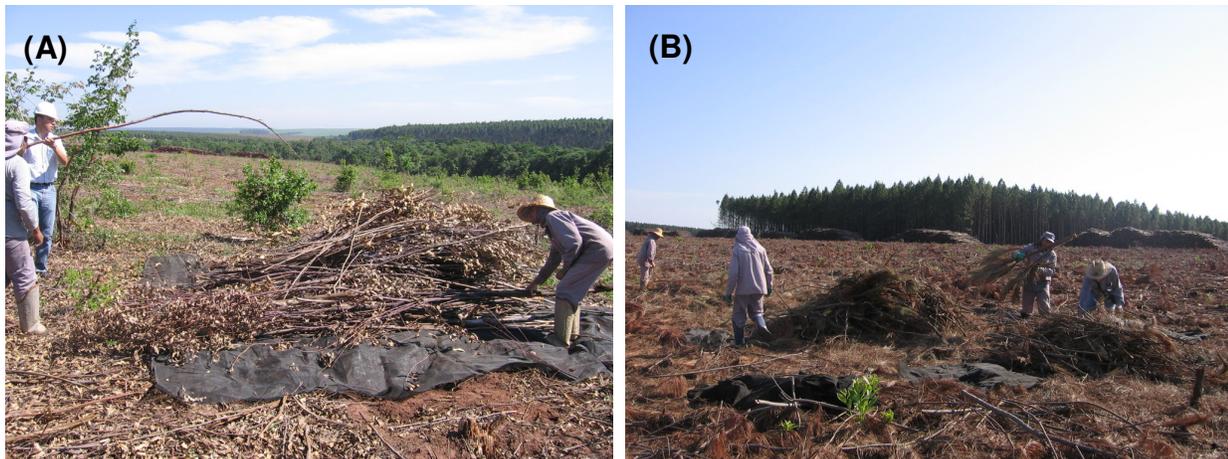


Figura 2 - Coleta de resíduos gerados da colheita de madeira de (A) eucalipto e (B) pinus

Os materiais foram retirados das áreas através de um trator retroescavadeira e levados para um caminhão munck (Figura 3), para então serem transportados para o local do próximo processamento.



Figura 3 - (A) Transporte de resíduos de eucalipto por meio de retroescavadeira e (B) descarregamento de resíduos de eucalipto no caminhão muncck

3.4 Pesagem e picagem do material

Os resíduos florestais provenientes da colheita foram transportados do campo até a sede da fazenda da empresa, onde foram pesados. A pesagem dos materiais foi adotada para se ter uma estimativa da quantidade de resíduos gerados por hectare. Para a retirada dos resíduos do caminhão, utilizou-se uma ponte rolante. Os materiais foram pesados em balança Filizola - Modelo 160, com carga máxima de 330 kg (Figura 4).



Figura 4 - Pesagem de resíduos de (A) eucalipto e (B) pinus

Depois da pesagem, todos os materiais foram transportados para a serraria Tabapinus - Serrarias Reunidas LTDA., Agudos - SP, para serem picados. O picador utilizado foi o picador a tambor Demuth - Modelo DPF 130/300 2 RT (Figuras 5).



Figura 5 - Picagem de resíduos de (A) eucalipto e (B) pinus por meio de picador a tambor

A picagem foi realizada de tal forma que, ao final do processo, se obteve dois lotes de materiais, cada um deles representando, separadamente, resíduos de eucalipto e de pinus. Em seguida cada lote sofreu processos de homogeneização (revolvimento), conduzidos manualmente. Após tal operação, os resíduos foram embalados em “big bags”, sendo então conduzidos para o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, onde foram armazenados em barracão sob abrigo do sol e chuva em ambiente com livre circulação de ar.

Um total de 5 “big bags” foi disponibilizado para cada espécie, tendo sido mantidas suas individualidades, o que permitiu considerar seus conteúdos como equivalentes a 5 repetições de amostras para a sequência das avaliações. Mantidas

tais individualidades, a partir de cada “big bag” foram sendo retiradas, aleatoriamente, quantidades menores de amostras para os testes previstos no estudo.

3.5 Tratamentos térmicos

Para as etapas de tratamento térmico dos resíduos da colheita florestal, os mesmos foram colocados em bandejas metálicas (25,0 x 10,0 x 10,0 cm), num total de 5 bandejas por tratamento. A capacidade de cada bandeja variou entre 157,0 e 243,8 g de resíduos secos equivalentes para eucalipto e entre 135,7 e 267,4 g para pinus.

Os tratamentos térmicos foram conduzidos nos Laboratórios Integrados de Química, Celulose e Energia do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. Os resíduos foram tratados em estufa Fanem - Modelo 320 - Digital, dotada de sistema de aquecimento por resistência elétrica e circulação forçada de ar interno, com volume nominal de 450 litros. Foram realizados cinco tratamentos térmicos por temperatura e espécie de madeira, cada um deles compreendendo material obtido individualmente de cada um dos cinco “big bags”.

Antes dos tratamentos térmicos, as bandejas foram colocadas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 100 °C, até atingirem peso constante, no sentido da eliminação de uma eventual influência da umidade da madeira.

Após a secagem, as bandejas com resíduos foram colocadas numa câmara metálica (65,0 x 65,0 x 15,0 cm), sendo esta, depois de fechada, introduzida na estufa de tratamento térmico (Figura 6).

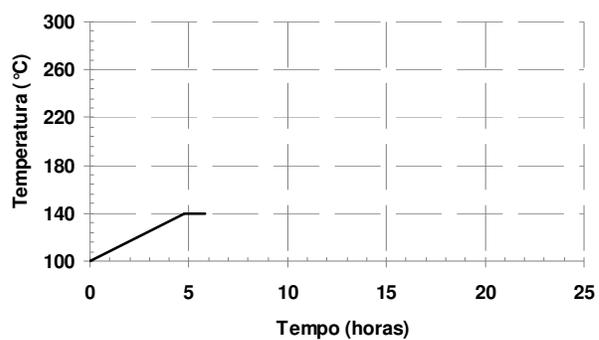
As temperaturas finais de tratamento usadas foram: 140, 180, 220, 260 e 300 °C, todas conduzidas a uma taxa de aquecimento de 0,1388 °C/minuto.

No sentido de se prevenir combustão acidental dos resíduos, decorrente da presença de oxigênio do ar atmosférico, para as temperaturas mais elevadas (220, 260 e 300 °C), foram introduzidos, a cada 20 minutos, doses de nitrogênio industrial no interior da câmara.

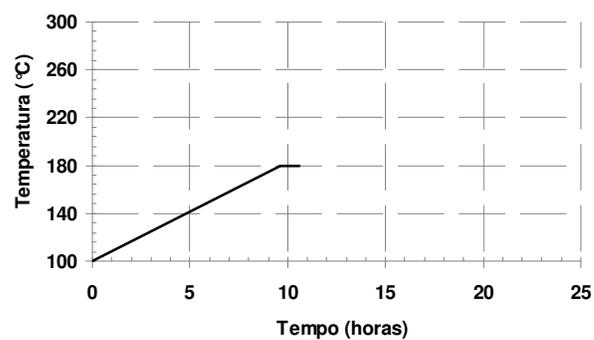


Figura 6 - (A) Bandejas com resíduos de eucalipto colocadas dentro da câmara metálica e (B) câmara fechada introduzida na estufa de tratamento térmico

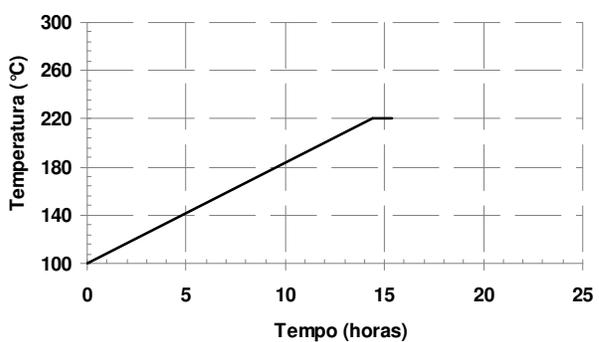
Saliente-se que os resíduos secos foram colocados na estufa com a temperatura pré-regulada a 100 °C, após o que se iniciou o processo de tratamento térmico conforme os gráficos apresentados a seguir (Figura 7). Um patamar de temperatura máxima constante foi mantido durante 1 hora ao final de cada tratamento. Após os tratamentos térmicos, a estufa era desligada e as amostras permaneciam no seu interior em resfriamento natural até atingirem a temperatura de 30 °C. Uma avaliação da perda de massa foi realizada mediante a pesagem de amostras antes (secas) e após a aplicação dos tratamentos.



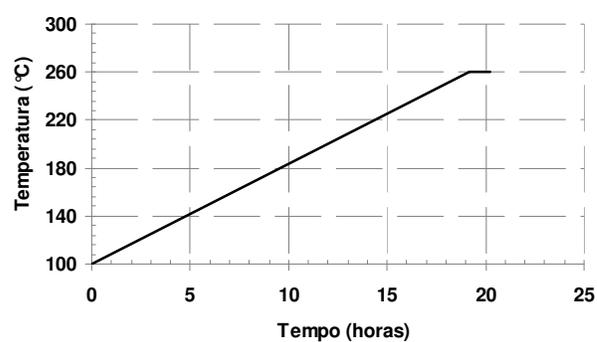
(A)



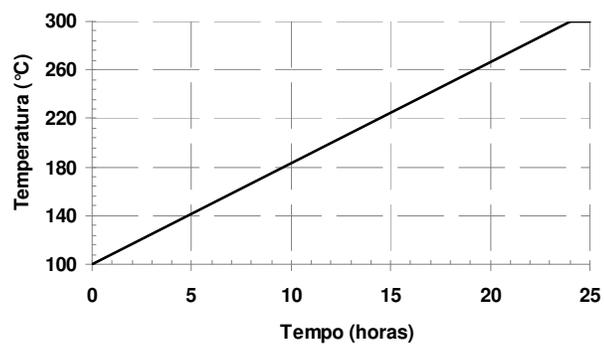
(B)



(C)



(D)



(E)

Figura 7 - Gráficos de temperatura versus tempo usados para tratamentos térmicos a (A) 140, (B) 180, (C) 220, (D) 260 e (E) 300 °C

A Figura 8 traz ilustração dos resíduos tratados termicamente.



Figura 8 - Resíduos de (A) eucalipto e de (B) pinus tratados termicamente

3.6 Caracterização dos resíduos

As amostras “in natura” (testemunha) e as tratadas termicamente foram submetidas a vários ensaios, com o intuito de determinar as alterações ocorridas no material, o que compreenderam:

- a) Teor de umidade do material “in natura”, expressa em porcentagem, calculada como a relação entre o seu peso úmido corrente e o seu peso após secagem em estufa a 103 ± 2 °C, até que este atingisse um valor constante, como mostra a eq. (1);

$$U = [(P_u - P_s)/P_s]*100 \quad (1)$$

onde:

U = teor de umidade (%)

P_u = peso úmido (g)

P_s = peso seco (g)

- b) Rendimento mássico de material tratado termicamente: determinou-se a relação entre a quantidade de material obtido após o tratamento térmico e a quantidade de material introduzido. O resultado do rendimento mássico, expresso em porcentagem, foi calculado mediante a eq. (2);

$$RM = (M_f/M_i)*100 \quad (2)$$

onde:

RM = rendimento mássico (%)

M_f = massa final após tratamento térmico (g)

M_i = massa inicial antes do tratamento térmico (g)

- c) Densidade do material a granel, conforme a norma ABNT NBR 6922;

- d) Granulometria mediante a passagem dos resíduos em conjunto de peneiras com diferentes granulometrias (Figura 9A). Calculou-se a quantidade porcentual de material retido em cada uma delas e o tamanho médio de suas partículas, mediante o uso de equipamento e procedimento sugerido pela norma ABNT NBR 7402 (Figura 9B);
- e) Poder calorífico superior determinado em bomba calorimétrica (Figura 10), conforme a norma ABNT NBR 8633;
- f) Análise imediata para a determinação dos teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, segundo a norma ABNT NBR 8112 (Figura 11);
- g) Índice de combustão (ICOM): as amostras testemunha e tratadas termicamente foram submetidas à verificação da temperatura e da massa que foi sendo consumida a cada instante durante a combustão (Figura 12), permitindo a elaboração de curvas de temperatura x tempo, massa x tempo e massa x temperatura (QUIRINO, 1991). A Figura 13 apresenta ilustrações referentes ao teste de combustão de amostras de resíduos;
- h) Resistência à moagem: operação que teve por finalidade reduzir, por ação mecânica, o tamanho do material, mediante o auxílio de um moinho centrifugal Jokro-Muhle, tendo como base metodológica a norma Merk-blatt V/105-VZIPC (Figura 14A e B). A hipótese testada foi a de que, nas mesmas condições de moagem, o material tratado termicamente sofreria uma fragmentação mais intensa que o material original. Isso foi avaliado mediante a determinação da granulometria dos materiais antes e após a moagem (Figura 14C), e suas respectivas frações médias. Testes operacionais preliminares foram efetuados para se definir o tempo de 5 minutos para a execução das moagens, o qual foi aplicado para todos os materiais estudados.
Para os testes de moagem, foram realizados tratamentos térmicos específicos, seguindo-se as mesmas condições metodológicas apontadas no item 3.5, com

temperaturas finais de tratamento, porém, de 140, 220 e 300 °C. O material usado, no entanto, constituiu-se de resíduos obtidos de forma diferenciada em condições de campo. Para tanto, optou-se pela coleta de ponteiros e galhos contendo madeira com casca com dimensões superiores a 3 cm de diâmetro (Figura 15). Tentou-se com isso, eliminar a presença de materiais finos que pudessem gerar pó já na sua origem (picagem e manuseio). Desse modo, a geração de pó ficaria potencialmente vinculada à redução da resistência do material de maior bitola após o tratamento térmico. A idéia foi a de que a presença de pó no material original poderia gerar um efeito de “amortecimento” durante o processo de moagem, reduzindo o efeito desta sobre os materiais de maior bitola.

- i) Microscopia eletrônica: foram realizadas avaliações qualitativas das partículas microscópicas dos materiais moídos tratados a 220 e 300 °C, utilizando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura Ambiental (MEVA, FEI Quanta 200) (Figura 16). A escolha das temperaturas de tratamento acima adotadas, excluindo-se a de 140 °C, foi devido às alterações morfológicas mais intensas nos materiais causadas por estes tratamentos. Esta etapa do estudo foi realizada no “Laboratoire d’Etudes des Ressources Forêt-Bois”, LERFOB (“Equipe Bois, Biomatériaux, Biomasse”), AgroParisTech - Nancy, França, graças ao apoio oferecido pelo Projeto FAPESP/INRA¹.

¹ Projeto “Estudo Multi-escala da Biomassa Torrada para Uso Energético: da micro-partícula ao processo industrial” (Processo Fapesp 2008/55366-1).

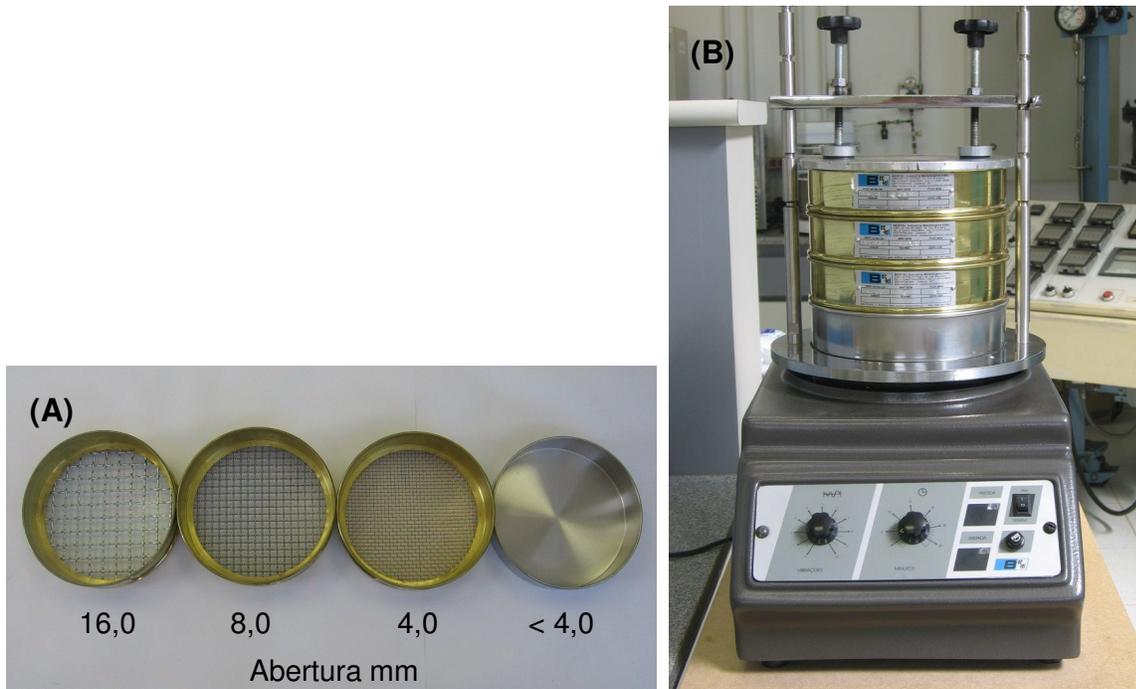


Figura 9 - (A) Peneiras utilizadas para análises granulométricas dos resíduos florestais e (B) agitador eletromagnético de peneiras



Figura 10 - Determinação do poder calorífico dos resíduos com o equipamento "C 2000 calorimeter system" da Ika®-Werke



Figura 11 - Ensaio de análise imediata de uma amostra de resíduos utilizando cadinho de platina com tampa e mufla, com capacidade para atingir 1000 °C

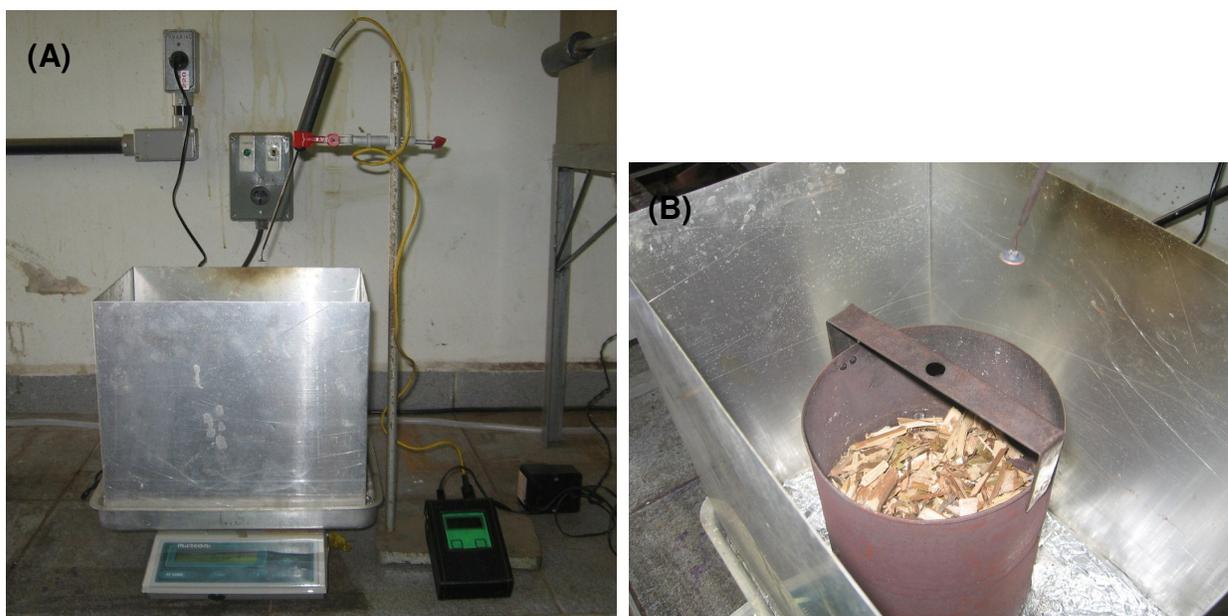


Figura 12 - (A) Conjunto de teste de combustão mostrando balança, anteparo do combustor, registrador de temperatura e termômetro digital; (B) detalhe do combustor mostrando a grelha com amostras de resíduos



Figura 13 - Exemplo de teste de combustão de uma amostra de resíduos



Figura 14 - (A) Moinho centrífugo Jokro-Muhle utilizado para a moagem dos resíduos e (B) detalhe de uma das placas utilizadas durante o ensaio; (C) Conjunto de placas com resíduos antes e depois de moídos, para as temperaturas de tratamento a 220 e 300 °C



Figura 15 - Coleta de resíduos lenhosos com casca (> que 3 cm de diâmetro) de (A) eucalipto e (B) pinus



Figura 16 - Microscópio Eletrônico de Varredura Ambiental (MEVA), FEI QUANTA 200

3.7 Análises estatísticas

Para os dados de cada ensaio realizado por espécie (eucalipto e pinus), foi adotado um delineamento experimental inteiramente casualizado, com cinco repetições em cada tratamento térmico (testemunha e madeiras tratadas a 140, 180, 220, 260 e 300 °C). Dessa maneira, foi aplicada uma análise de variância (ANOVA), a 1% de significância, com o propósito de verificar a influência do tratamento térmico nestes ensaios.

Segue-se o quadro da análise de variância:

Causas da variação	G.L.
Tratamento	5
Resíduo	24
Total	29

Para a comparação entre os tratamentos térmicos, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância.

No caso particular do ensaio de resistência à moagem, adotou-se também o delineamento inteiramente ao acaso, considerando quatro tratamentos térmicos (testemunha e madeiras tratadas a 140, 220, e 300 °C) e dois estados (antes e após a moagem), para ambas as espécies. Foram realizadas cinco repetições de cada ensaio para resistência à moagem.

O quadro da análise de variância, a 1% de significância, para a resistência à moagem é:

Causas da variação	G.L.
Tratamento	3
Repetição	4
Estado	1
Tratamento*Estado	3
Resíduo	28
Total	39

O teste de médias utilizado, neste caso, também foi o de Tukey, com 5% de significância.

Os resultados das análises de variância com aplicação do teste F, para todos os ensaios, são apresentados nas Tabelas de 1 a 33, presentes no Anexo.

Não se aplicou análise estatística nas avaliações em microscopia eletrônica, considerando-se que as mesmas foram apenas qualitativas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Quantidade de resíduos florestais por unidade de área e árvore e teor de umidade

Na Tabela 1 são apresentados os valores estimados referentes à massa de resíduos gerados da colheita de madeira de eucalipto e pinus por unidade de área e árvore, e o teor de umidade. Para efeito da quantificação, foi considerado o peso de resíduos florestais não picados, ou seja, da maneira como foram coletados no campo.

Tabela 1 - Estimativa da massa de resíduos florestais gerados por unidade de área e por árvore e teor de umidade

Material	Peso de resíduos		Teor de umidade %	
	t/ha	kg/árvore	Média ¹	C.V.
Resíduos de eucalipto	8,5	5,1	10,4	3,8
Resíduos de pinus	23,6	11,8	15,8	11,4

¹ Médias de 10 repetições.
C.V. Coeficiente de variação (%).

Os resultados indicaram a presença de maior quantidade de resíduos de pinus por hectare, comparada aos obtidos com eucalipto. Tal fato pode ser explicado devido à maior quantidade de resíduos por unidade de árvore para a espécie, eliminando-se dessa forma o efeito do espaçamento. Na média, os valores foram de 5,1 kg/árvore de eucalipto e 11,8 kg/árvore de pinus. Diga-se que, no caso do pinus, foi possível constatar-se, visualmente, a maior presença de resíduos com maiores dimensões, como galhos grossos e pedaços de fuste. Esse fato foi decorrência da própria característica da madeira de pinus que tem a tendência de se quebrar com maior facilidade durante a operação de derrubada da árvore, quando comparada ao eucalipto. Com isso, foram geradas peças de madeira que não atendiam as exigências

dimensionais da matéria-prima para a fabricação de MDF e chapa de fibra², gerando resíduos excedentes.

Os resultados encontrados mostraram que os teores de umidade das amostras de eucalipto eram inferiores às das amostras de pinus, provavelmente pelo fato dos primeiros terem permanecido em campo por mais tempo depois da colheita de madeira, antes de serem retirados para estudo.

Realizou-se ainda a quantificação dos componentes dos resíduos, separando-se as frações referentes à madeira com casca, casca solta, folha (eucalipto) e acícula (pinus), conforme demonstrado no quadro que segue:

Material	Madeira com casca	Casca solta	Folha ou acícula
	(%) ¹		
Resíduos de eucalipto²	74,9 (20,5)	...	25,0 (34,6)
Resíduos de pinus	74,0 (18,9)	8,6 (42,3)	17,3 (18,6)

¹ Médias de 5 repetições. O coeficiente de variação (%) é apresentado entre parênteses.

² Para o eucalipto, as cascas soltas foram reunidas no cálculo porcentual juntamente com as folhas, dada a dificuldade para suas separações.

Na composição dos materiais estudados observa-se que, para ambos os resíduos, aproximadamente, 74% dos componentes são representados pela madeira com casca, enquanto que, aproximadamente, 26% de suas composições são as demais frações como cascas soltas, folhas ou acículas e demais materiais finos. No caso do pinus, ressalta-se a presença de 17,3% somente de acículas. Para o eucalipto, é importante comentar que as folhas e cascas soltas somaram juntas 25%, sendo a grande maioria dessa composição representada pela casca. Durante o manuseio e, principalmente, picagem do material de eucalipto, houve perdas de grandes quantidades de folhas.

Portanto, constatou-se que a maior diferença observada entre os componentes dos resíduos de eucalipto quando comparado ao pinus, está na sua maior porcentagem de casca. No caso do pinus, o destaque ficou por conta da presença considerável de

² Produtos da empresa Duratex (Duraflora S.A.) - Lençóis Paulista - SP.

acículas. Tais observações podem ser válidas para explicar parte do comportamento dos resíduos durante os tratamentos térmicos.

4.2 Rendimento do tratamento térmico

A Tabela 2 e a Figura 17 apresentam os resultados de rendimento mássico dos resíduos de eucalipto e de pinus tratados a temperaturas finais de 140, 180, 220, 260 e 300 °C.

Tabela 2 - Rendimento mássico do tratamento térmico dos resíduos de eucalipto e pinus

Tratamento	Rendimento mássico %			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
140 °C	100,0 a	0,00	99,9 a	0,06
180 °C	95,4 b	0,07	97,6 b	0,16
220 °C	85,3 c	0,18	89,9 c	0,30
260 °C	76,1 d	0,66	80,5 d	0,19
300 °C	58,3 e	0,71	61,4 e	0,46
F	2,2*10 ^{-16***}		2,2*10 ^{-16***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Os resultados indicaram que os rendimentos mássicos, tanto para os resíduos de eucalipto como para os resíduos de pinus, foram afetados significativamente pelas temperaturas de tratamento. A maioria dos estudos estabelece claramente que 95% das reações de degradação térmica da madeira acontecem entre 200 e 400 °C. Sobretudo, em se tratando de temperaturas acima de 250 °C, essa queda no rendimento pode ser principalmente explicada pela degradação das hemiceluloses (HAKKOU et al., 2006).

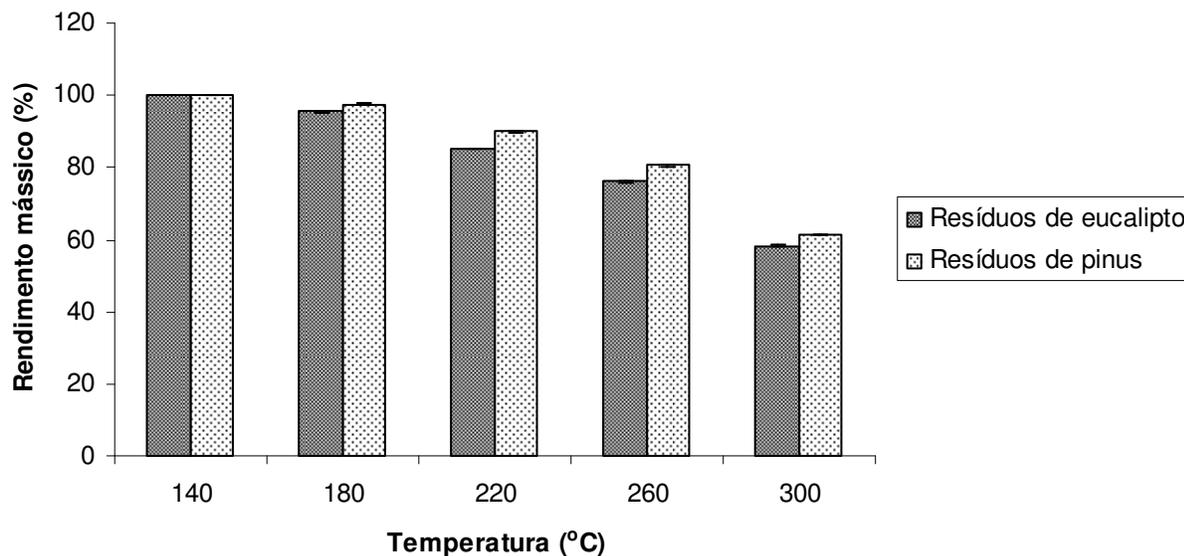


Figura 17 - Rendimento mássico em função da temperatura de tratamento dos resíduos de eucalipto e pinus. As barras indicam o erro padrão das médias

Em relação ao efeito da temperatura na perda de massa, num estudo realizado com 3 espécies de *Eucalyptus* tratados termicamente, Almeida, Brito e Perré (2009) verificaram a ocorrência de três fases: a) perda de massa < 5% para o tratamento realizado a 180 °C; b) perda de massa entre 5% e 17% para o tratamento térmico realizado a 220 °C e c) perda de massa > 25% para o tratamento térmico a 280 °C. No presente estudo, pode-se constatar os mesmos tipos de comportamento para ambas as espécies, ou seja: a) Eucalipto - perda de massa < 4,8% para o tratamento a 180 °C; perda de massa entre 4,8% e 15,1% para o tratamento a 220 °C; perda de massa entre 15,2% e 26,3% para o tratamento a 260 °C e perda de massa > 44,4% para o tratamento a 300 °C; b) Pinus - perda de massa < 2,9% para o tratamento a 180 °C; perda de massa entre 2,9% e 10,8% para o tratamento a 220 °C; perda de massa entre 10,9% e 20,1% para o tratamento a 260 °C e perda de massa > 39,5% para o tratamento a 300 °C;

4.3 Densidade do material a granel

A densidade a granel dos resíduos “in natura” e dos materiais tratados termicamente são apresentados na Tabela 3 e na Figura 18.

Tabela 3 - Densidade a granel dos resíduos de eucalipto e pinus

Tratamento	Densidade a granel kg/m ³			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha ²	193,5 ³ a	9,02	207,3 ⁴ a	1,49
140 °C	161,4 bc	7,41	164,3 b	4,04
180 °C	181,3 ab	5,68	168,9 b	6,76
220 °C	176,2 ab	2,60	168,7 b	7,41
260 °C	172,0 abc	6,26	152,4 bc	6,54
300 °C	147,3 c	4,74	135,0 c	2,16
F	0,0006***		5,5*10 ⁻⁸ ***	

¹ Médias de 5 repetições.

² Determinação da densidade do material a granel em seu estado como recebido em laboratório (“in natura”).

³ Teor de umidade médio do material picado: 10,4%.

⁴ Teor de umidade médio do material picado: 15,8%.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Os resultados da densidade a granel indicaram diferenças estatísticas tanto para os resíduos de eucalipto como para os resíduos de pinus, constatando o efeito dos tratamentos térmicos. Observou-se uma queda mais acentuada nos materiais tratados a 300 °C, sendo tal comportamento explicado pela perda de massa mais intensa nesta temperatura.

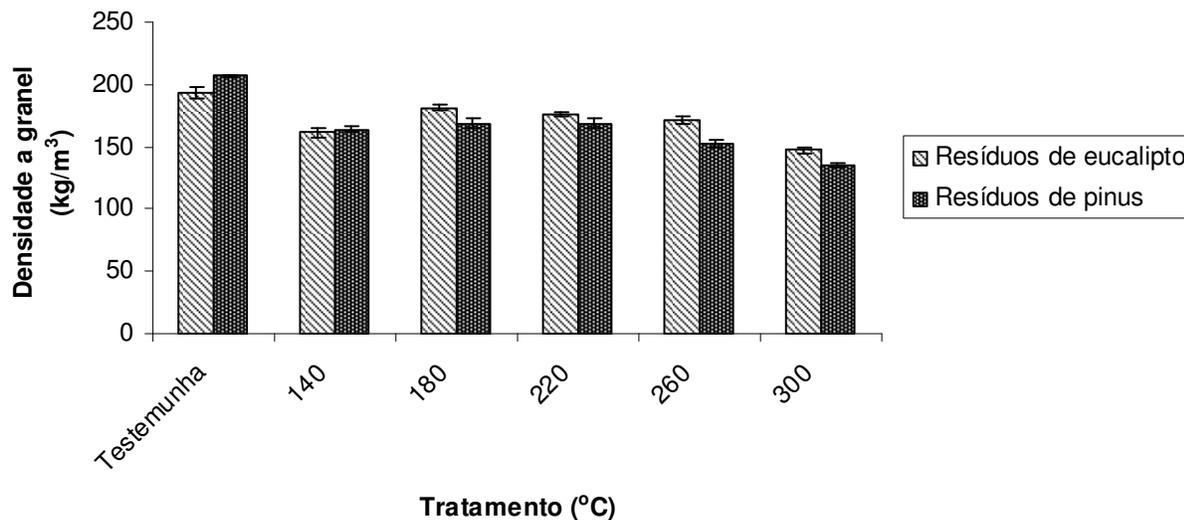


Figura 18 - Densidade a granel dos resíduos de eucalipto e pinus. As barras indicam o erro padrão das médias

Para efeito comparativo, mencione-se o trabalho de Pedrazzi et al. (2010), que indica um valor de 186 kg/m^3 para a densidade a granel de cavacos de *Eucalyptus* sp. Da mesma forma Silva et al. (2007), mencionam-se para carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais nativas, valores de densidade a granel variando de $178,5$ a $231,1 \text{ kg/m}^3$. Desse modo, os resultados de densidade a granel dos resíduos, mesmo após o tratamento térmico, estão compatíveis com a escala, tanto de cavacos de madeira como de carvão vegetal. Portanto, no quesito densidade a granel, seriam válidas as mesmas considerações quanto da aplicação destes materiais no campo energético. Evidentemente, devem ser levadas em conta as variações em função das degradações térmicas ocorridas.

4.4 Granulometria

Os resultados da distribuição granulométrica dos resíduos (testemunha e termicamente tratados) são apresentados nas Tabelas de 4 a 7 e nas Figuras 19 e 20. A Tabela 8 e a Figura 21 apresentam os resultados do cálculo do tamanho médio dos

resíduos. Em todos os casos, as análises estatísticas mostraram-se significativas para o ensaio proposto.

Observou-se que os materiais de eucalipto e de pinus se comportaram diferentemente nos ensaios granulométricos, devido às próprias características originais da espécie (densidade, tipo de casca, etc.), que induziram a influência de outros fatores como o tamanho e a forma dos resíduos picados.

Os resultados encontrados para análise granulométrica dos resíduos de eucalipto mostraram que 55,5% dos materiais testemunha e 53,2% dos materiais tratados a 140 °C, ficaram retidos na primeira peneira, ou seja, a de maior malha, com abertura de 16 mm. Esta retenção se deu, principalmente, devido a presença de casca que, formando um emaranhado, impedia que as partículas de menores dimensões passassem para as peneiras subseqüentes. Tal situação não ocorreu para os tratamentos de 180 a 300 °C, pelo fato da casca, a tais temperaturas, ter sofrido alterações quando submetida à ação do calor, tornando o material, no seu todo, mais facilitado para os ensaios granulométricos.

Ainda para os resíduos de eucalipto, o destaque ficou por conta das temperaturas de tratamento a 220, 260 e 300 °C, evidenciando a influência dos tratamentos térmicos. Os resultados indicaram maior fragmentação dos materiais tratados que o material testemunha, principalmente a 300 °C. Houve uma redução significativa do tamanho do material, que se concentrou, em expressiva proporção, nas dimensões abaixo de 8,0 mm (52,2%, 54,1% e 62,6% para as temperaturas de 220, 260 e 300 °C). Este fato pode ser associado à redução da resistência mecânica dos materiais, conforme relatado na literatura. Tal redução reflete-se no aumento da friabilidade que é a propriedade da madeira em gerar finos (pó). Arias et al. (2008), confirmam tal fato ao declarar que a madeira torrificada torna-se mais quebradiça e por isso pode ser esmagada em um pó fino, o mesmo que o carvão. A queima de madeira em forma de finos é mais eficiente, pois há um aumento da superfície específica do combustível o que fornece melhores condições para transferência de calor.

A diminuição da granulometria dos resíduos de eucalipto devido aos tratamentos térmicos induziu, obviamente, à redução significativa do tamanho médio das partículas, sendo isto mais fortemente observado a partir da temperatura de 180 °C.

Em relação aos resíduos de pinus, observou-se que as maiores porcentagens de retenção de material, para a testemunha e para os termicamente tratados a 140 e 180 °C, se encontravam na peneira de abertura de malha 16 mm. No caso, ficaram retidos nessa primeira peneira 63,7%, 57,5% e 60,0%, respectivamente, para o material testemunha e materiais obtidos nas temperaturas de 140 e 180 °C.

Na análise granulométrica dos resíduos de pinus observou-se que, embora os materiais tratados tenham sofrido uma transformação mais intensa que o material “in natura” (testemunha), principalmente aqueles obtidos acima de 220 °C, comparativamente ao eucalipto, constatou-se uma maior concentração de material retido nas duas primeiras peneiras de malha correspondentes a 16 e 8 mm, ou seja, 61,9%, 65,6% e 55,2% de retenção para os materiais tratados, respectivamente, a 220, 260 e 300 °C. A presença de materiais de tamanhos maiores pode estar relacionada à espessura dos resíduos na sua origem o que influenciou a picagem do material, favorecendo a presença de peças de tamanho mais heterogêneo.

Desse modo, com a diminuição da granulometria dos resíduos de pinus devido aos tratamentos térmicos, também houve uma redução significativa do tamanho médio das partículas sendo isto mais evidenciado a partir da temperatura de 220 °C.

Numa abordagem sobre esta questão, Pottie e Guimier (1985) afirmam que o tamanho e a forma das partículas do combustível afetam a taxa de conversão energética durante a queima de duas maneiras. Primeiro, partículas com tamanho e forma diferentes possuem diferentes superfícies úteis de contato por unidade de volume ou peso de combustível. Uma vez que as reações químicas ocorrem na superfície das partículas, a desuniformidade afeta a taxa de queima do material. Segundo, o tamanho e a forma das partículas do combustível determinam o fator de volume sólido, ou seja, a quantidade de espaços vazios por unidade de volume ou peso do material. Assim, a quantidade de oxigênio presente nesses espaços vazios também afeta a taxa de queima do combustível.

Tabela 4 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha de 16,0 mm

Tratamento	Porcentagem do retido - 16,0 mm			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	55,5 a	4,05	63,7 a	1,96
140 °C	53,2 a	3,90	57,5 a	3,31
180 °C	26,0 b	4,30	60,0 a	5,19
220 °C	15,2 bc	2,44	21,3 b	3,58
260 °C	14,1 bc	2,98	26,7 b	2,15
300 °C	10,6 c	1,18	17,1 b	3,46
F	1,6*10 ^{-10***}		9,3*10 ^{-11***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Tabela 5 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha de 8,0 mm

Tratamento	Porcentagem do retido - 8,0 mm			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	16,5 b	2,11	14,6 b	1,91
140 °C	18,5 b	1,43	16,9 b	2,77
180 °C	30,0 a	3,45	13,1 b	3,33
220 °C	32,7 a	0,97	40,6 a	2,59
260 °C	31,8 a	0,75	38,9 a	1,76
300 °C	26,8 a	1,18	38,0 a	3,11
F	2,3*10 ^{-6***}		6,7*10 ^{-9***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Tabela 6 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha de 4,0 mm

Tratamento	Porcentagem do retido - 4,0 mm			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	16,4 c	1,51	10,6 c	1,47
140 °C	17,9 c	1,48	13,8 bc	1,09
180 °C	25,4 b	0,92	13,7 bc	1,11
220 °C	29,3 ab	1,13	19,0 a	1,18
260 °C	29,3 ab	1,70	17,3 ab	1,17
300 °C	31,54 a	0,70	20,8 a	0,92
F	1,0*10 ^{-8***}		1,7*10 ^{-5***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Tabela 7 - Resultados da análise granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus para abertura de malha menor que 4,0 mm

Tratamento	Porcentagem do retido - < 4,0 mm			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	11,7 d	0,69	10,1 c	0,63
140 °C	10,5 d	1,22	11,9 bc	1,85
180 °C	18,6 c	1,26	13,2 bc	1,51
220 °C	22,9 bc	0,83	19,1 ab	2,51
260 °C	24,8 b	1,37	17,1 abc	0,39
300 °C	31,1 a	1,42	24,1 a	2,76
F	1,4*10 ^{-11***}		0,0001***	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

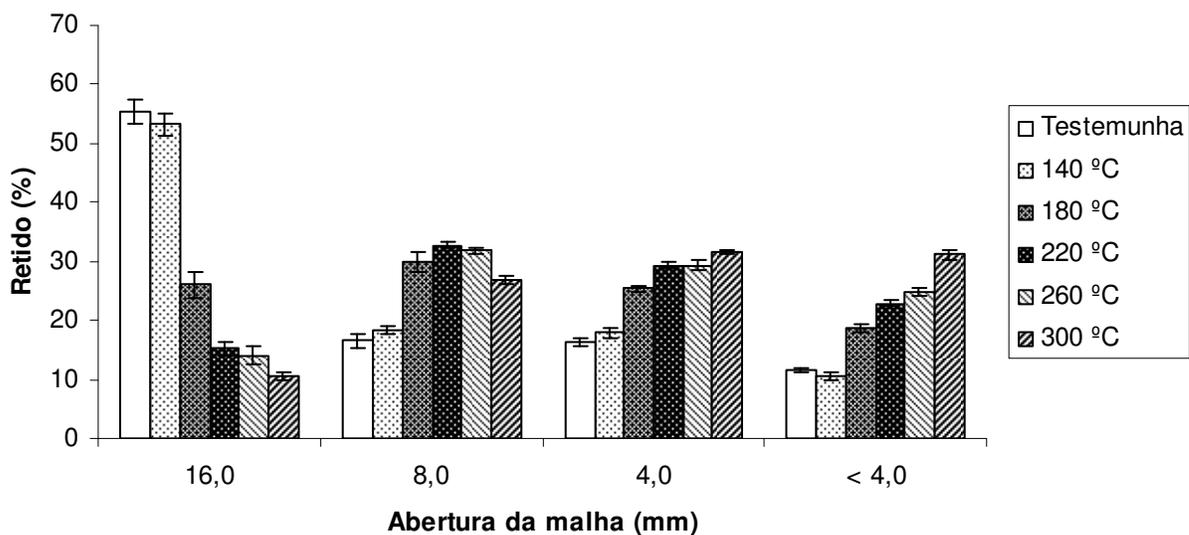


Figura 19 - Porcentagem do material retido em função da abertura da malha, determinada pela análise granulométrica dos resíduos de eucalipto. As barras indicam o erro padrão das médias

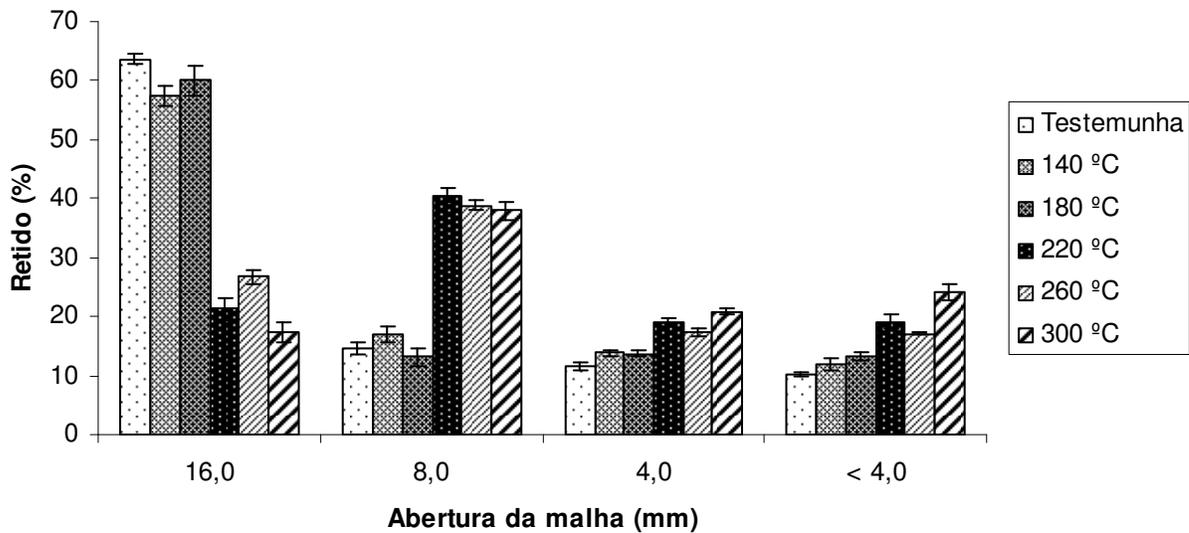


Figura 20 - Porcentagem do material retido em função da abertura da malha, determinada pela análise granulométrica dos resíduos de pinus. As barras indicam o erro padrão das médias

Tabela 8 - Resultados do tamanho médio dos resíduos de eucalipto e pinus

Tratamento	Tamanho médio mm			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	8,2 a	0,14	8,6 a	0,06
140 °C	8,2 a	0,21	8,3 ab	0,22
180 °C	6,9 b	0,16	8,2 abc	0,21
220 °C	6,3 bc	0,12	7,3 cd	0,31
260 °C	6,1 cd	0,24	7,6 bcd	0,10
300 °C	5,3 d	0,14	6,7 d	0,31
F	$2,1 \cdot 10^{-11}***$		$1,4 \cdot 10^{-5}***$	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

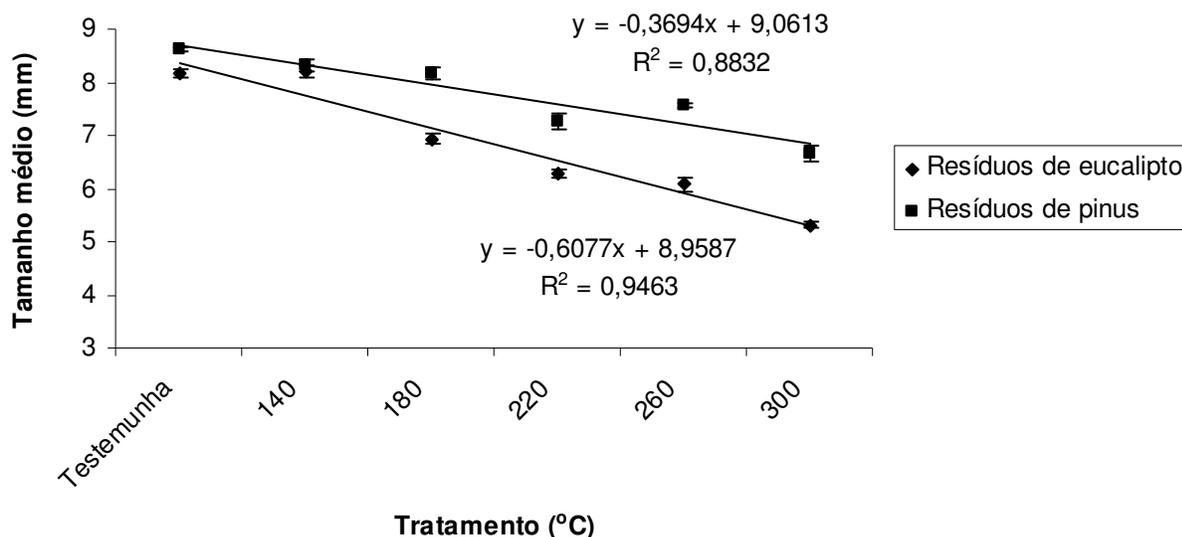


Figura 21 - Tamanho médio dos resíduos de eucalipto e pinus em função do tratamento térmico. As barras indicam o erro padrão das médias

4.5 Poder calorífico superior

Os dados referentes ao poder calorífico superior (PCS) dos resíduos de eucalipto e pinus (testemunha e termicamente tratados) são apresentados na Tabela 9 e na Figura 22.

Tabela 9 - Poder calorífico superior dos resíduos de eucalipto e pinus

Tratamento	Poder calorífico superior kcal/kg			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	4663,0 d	15,82	4834,9 d	34,15
140 °C	4647,4 d	13,41	4876,3 d	10,96
180 °C	4717,4 d	5,87	4900,8 d	7,86
220 °C	4950,9 c	7,99	5045,0 c	15,33
260 °C	5218,6 b	13,07	5393,9 b	11,85
300 °C	6425,1 a	55,08	6295,9 a	58,91
F	2,2*10 ^{-16***}		2,2*10 ^{-16***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Os resultados indicaram uma tendência de aumento conforme a elevação da temperatura de tratamento, para ambas as espécies, com significativo acréscimo do poder calorífico superior a partir de 220 °C. Fato semelhante foi observado por Phanphanich e Mani (2011), durante averiguação das características da biomassa florestal torrificada à temperaturas variando de 225 a 300 °C e 30 minutos de tempo de residência, onde se constatou aumento do poder calorífico superior da biomassa tratada com o aumento da temperatura de torrefação.

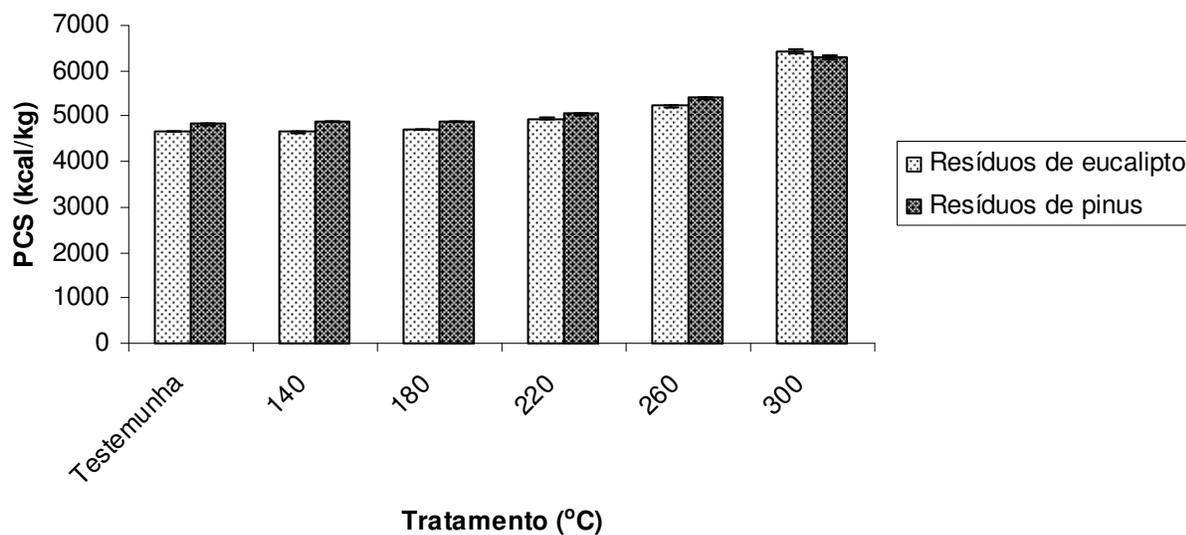


Figura 22 - Poder calorífico superior dos resíduos de eucalipto e pinus. As barras indicam o erro padrão das médias

Tanto para os resíduos de eucalipto como para o pinus, os valores encontrados foram condizentes com a literatura. Felfli et al. (2005), encontraram valores de 21,0 MJ/kg a 220 °C e 22,1 MJ/kg a 250 °C para briquetes de madeira tratados por uma hora. Para Doat (1985a), os valores relatados de poder calorífico superior para madeira torreficada variaram de 21,8 a 25,1 MJ/kg.

Na torrefação de biomassa, se perde, relativamente, mais oxigênio e hidrogênio em relação ao carbono. A água de desidratação é o melhor exemplo, mas também todos os produtos da reação orgânica (ácido acético, furanos, metanol) e gases (principalmente CO₂ e CO) contêm uma quantidade considerável de oxigênio. Um aumento do poder calorífico é o principal resultado disto (BERGMAN; KIEL, 2005).

É importante destacar que o valor do poder calorífico de materiais tratados termicamente, dependendo da qualidade do material e das condições de ensaio, é intermediário entre a madeira e o carvão. De fato, como observa Munalula e Meincken (2009), a madeira normalmente possui poder calorífico entre 18 e 20 MJ/kg, enquanto que o carvão, segundo Wood e Baldwin (1985), apresenta valor muito maior de cerca de 33 MJ/kg.

Os valores obtidos de poder calorífico superior do pinus foram ligeiramente maiores que os do eucalipto, exceto no tratamento a 300 °C. Ressalte-se que Soares e Hakkila (1987), afirmam que a resina e outros produtos existentes em maiores proporções nas acículas e nos ramos das coníferas têm maior poder calorífico que as folhosas.

No tratamento a 300 °C, houve um ganho energético maior do que nos demais tratamentos, levando-se em consideração o poder calorífico superior da testemunha, principalmente para os resíduos de eucalipto (37,8%). Arias et al. (2008), verificaram um poder calorífico superior de 22,8 MJ/kg a 260 °C e 25,0 MJ/kg a 280 °C para *Eucalyptus sp.*, ambos tratados por 60 minutos.

4.6 Índice de combustão (ICOM)

O índice de combustão (ICOM) dos resíduos de eucalipto e de pinus é apresentado nas Tabelas 10 e 11 e nas Figuras de 23 a 26.

Ao se analisar o comportamento dos resíduos de eucalipto durante a combustão, observou-se pela Tabela 10 e Figura 23 que o valor da temperatura máxima alcançada variou significativamente apenas para o material testado a 300 °C, levando-se em consideração todos os tratamentos. No entanto, o tempo para se atingir a temperatura máxima não variou expressivamente, independentemente do tratamento. A temperatura máxima foi alcançada rapidamente, já nos primeiros minutos do teste de combustão (de 3 a 5 minutos).

A Tabela 10 assim como a Figura 24 mostram que, dentre os tratamentos testados, os materiais tratados a 260 e 300 °C consumiram menor porcentagem de massa durante o teste de combustão, em função do tempo.

Comparando-se os diferentes tratamentos entre si, o ICOM apresentou-se significativamente mais elevado em função do tratamento térmico para o eucalipto, atingindo o valor médio de 0,83 para o tratamento a 300 °C. Quanto maior o ICOM, melhor o desempenho global na combustão, significando que quanto maior a temperatura de tratamento, mais energia (calor) vai ser gerada com o menor consumo de massa combustível.

Os índices de combustão observados na Tabela 10 estão de acordo com Quirino e Brito (1991), que encontraram valores variando de 0,31 a 1,23 para briquetes produzidos com carvão vegetal misturado à serragem, carvão mineral, nitrato, cinzas e aglomerante.

Tabela 10 - Índice de combustão, temperaturas máxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima e na temperatura final do teste dos resíduos de eucalipto

Tratamento °C	T máx. °C	T final °C	Consumo de massa %		ICOM
			T máx.	T final	
Testemunha	614,4 (7,74) a	95,1 (2,00) a	79,0 (0,38) a	99,3 (0,07) a	0,69 (0,01) c
140	602,6 (13,79) a	89,5 (3,08) a	50,7 (0,26) d	99,7 (0,02) a	0,69 (0,01) c
180	593,8 (4,05) a	94,2 (2,05) a	65,6 (4,41) bc	97,1 (0,26) b	0,74 (0,01) b
220	631,0 (2,77) a	93,3 (1,67) a	69,5 (1,36) ab	99,6 (0,04) a	0,75 (0,01) b
260	576,6 (4,91) a	74,8 (18,50) a	70,7 (1,25) ab	99,5 (0,02) a	0,80 (0,00) a
300	424,6 (44,93) b	93,2 (1,78) a	54,3 (5,53) cd	91,3 (0,88) c	0,83 (0,01) a
F	$1,2 \times 10^{-6}$ ***	0,4509 ^{n.s.}	$4,3 \times 10^{-6}$ ***	$4,5 \times 10^{-14}$ ***	$1,3 \times 10^{-10}$ ***

¹ Médias de 5 repetições. O erro padrão da média é apresentado entre parênteses.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

^{n.s.} Não significativo.

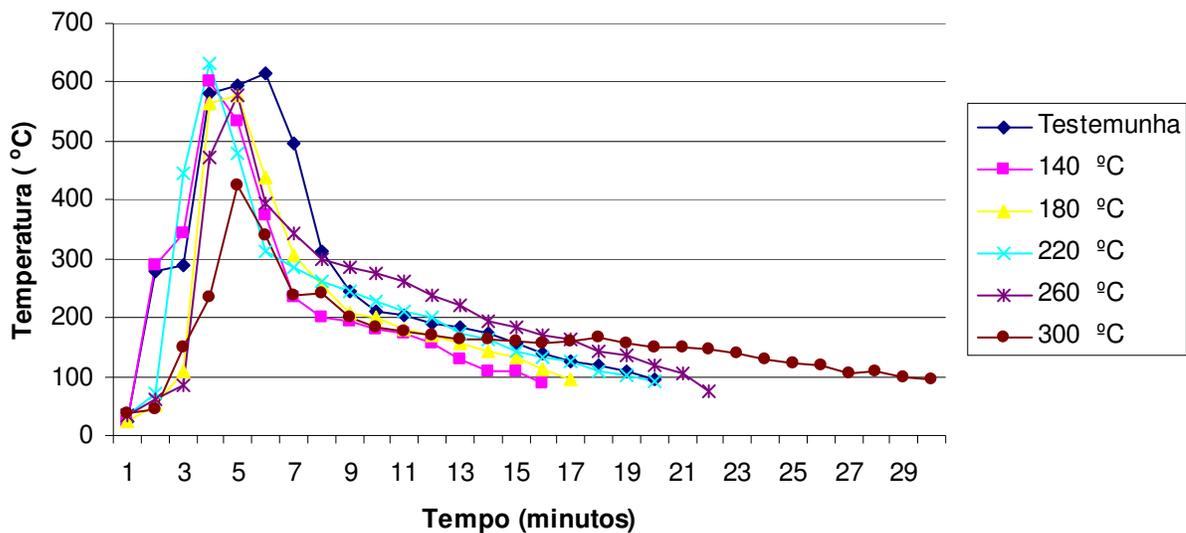


Figura 23 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão dos resíduos de eucalipto

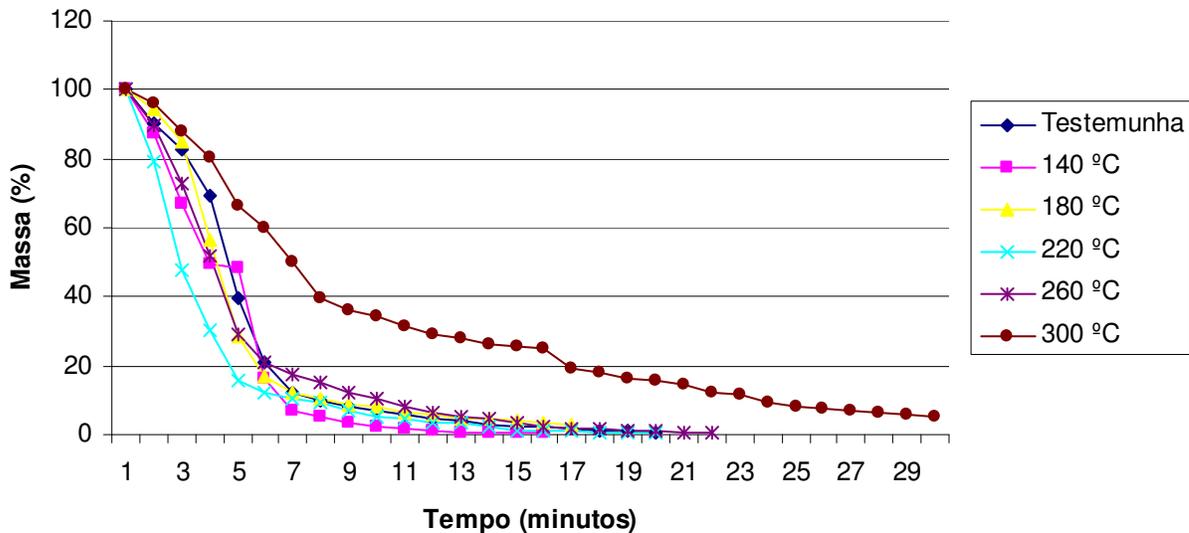


Figura 24 - Consumo de massa durante o teste de combustão dos resíduos de eucalipto

Em relação aos resíduos de pinus, durante o teste de combustão, como pode ser visualizada na Tabela 11 e na Figura 25, a temperatura máxima alcançada variou significativamente de acordo com o material analisado, levando-se em conta todos os

tratamentos testados. As temperaturas máximas alcançadas foram inferiores para os tratamentos a 260 e 300 °C, comparativamente aos outros tratamentos. Em contrapartida, o tempo para se alcançar a temperatura máxima não variou expressivamente, independente do tratamento, sendo tal temperatura alcançada nos primeiros minutos do teste de combustão. Quanto à temperatura final, observou-se que para os resíduos tratados a 220, 260 e, principalmente, a 300 °C, o tempo necessário para que a temperatura final atingisse menos de 100 °C, foi maior do que para os demais tratamentos.

Os dados da Tabela 11 e da Figura 26, referentes à massa consumida, mostram que, para todos os tratamentos, as temperaturas de 220, 260 e 300 °C consumiram menor porcentagem de massa em função do tempo durante o teste de combustão, com destaque para a temperatura de tratamento a 300 °C.

Tabela 11 - Índice de combustão, temperaturas máxima e final alcançadas no teste e porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima e na temperatura final do teste dos resíduos de pinus

Tratamento °C	T máx. °C	T final °C	Consumo de massa %		ICOM
			T máx.	T final	
Testemunha	581,2 ¹ (8,08) a	92,8 ¹ (0,86) c	53,0 ¹ (0,54) c	98,8 ¹ (0,05) a	0,67 ¹ (0,01) d
140	598,0 (1,55) a	97,0 (0,27) ab	77,2 (2,58) a	98,1 (0,04) ab	0,69 (0,01) cd
180	561,4 (1,78) b	97,6 (0,54) a	60,9 (1,28) b	99,5 (0,03) a	0,70 (0,01) bcd
220	600,0 (5,39) a	93,6 (0,88) c	42,7 (0,92) d	97,1 (0,04) b	0,71 (0,01) bc
260	511,6 (1,96) c	94,6 (0,62) bc	37,2 (0,17) d	95,2 (0,79) c	0,72 (0,00) ab
300	477,4 (4,37) d	97,8 (0,37) a	55,7 (0,49) bc	90,2 (0,14) d	0,75 (0,00) a
F	3,0*10 ^{-16***}	8,3*10 ^{-6***}	2,6*10 ^{-16***}	1,2*10 ^{-15***}	2,1*10 ^{-6***}

¹ Médias de 5 repetições. O erro padrão da média é apresentado entre parênteses.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

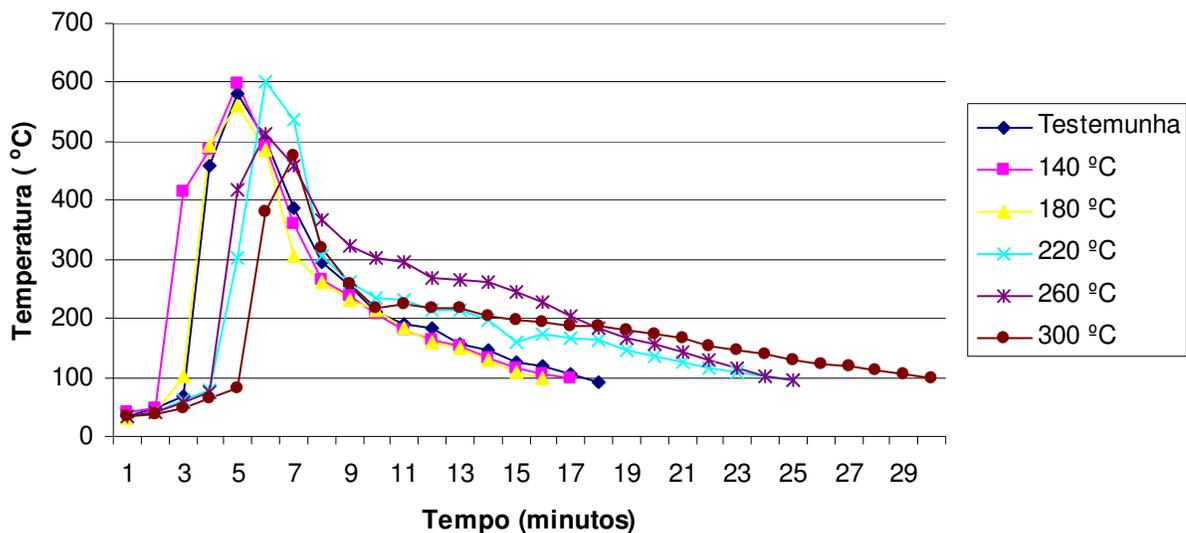


Figura 25 - Variação da temperatura em função do tempo durante o teste de combustão dos resíduos de pinus

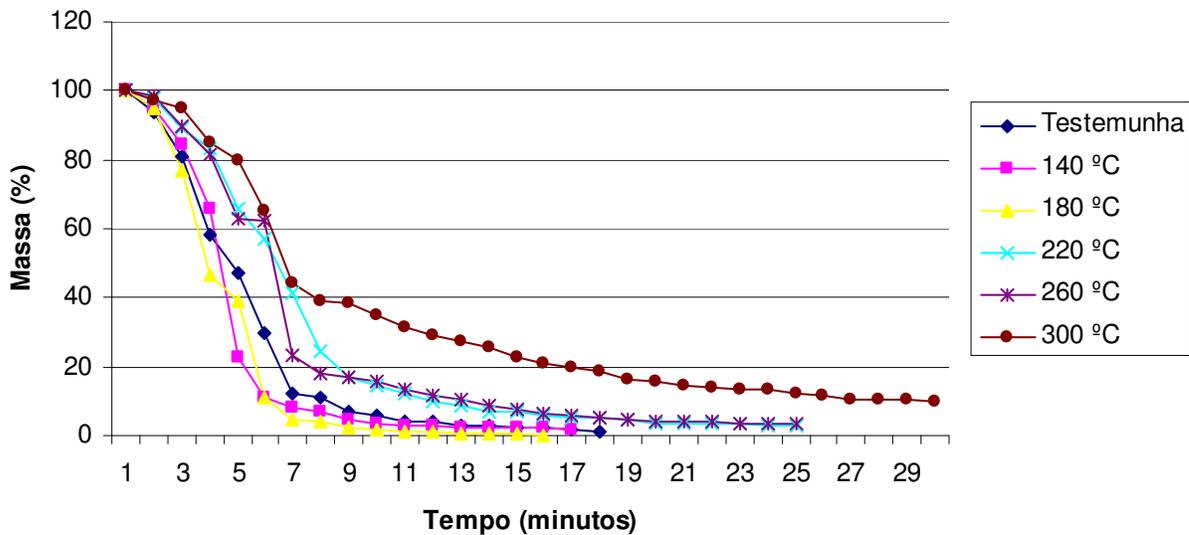


Figura 26 - Consumo de massa durante o teste de combustão dos resíduos de pinus

Reportando-se ao ICOM, para os resíduos de pinus e para todos os tratamentos, observou-se tendência para que, com o aumento das temperaturas de tratamento, houvesse aumento no ICOM, atingindo um valor médio significativo de 0,75 para o

tratamento a 300 °C. Ramos e Paula et al. (2011), avaliaram briquetes de resíduos de biomassa vegetal e encontraram valores do ICOM de 0,44 e 0,55 para os briquetes de maravalha da madeira e serragem da madeira, respectivamente. Do mesmo modo, os autores também constataram resultados do ICOM de 0,52 para madeira maciça e 0,56 para o carvão, que eram testemunhas do ensaio.

De forma genérica, pode-se afirmar que o ICOM é um indicativo satisfatório do comportamento de um material durante a combustão, e que quanto maior o seu valor, superior é a qualidade do material. Desse modo, os valores encontrados, tanto para o eucalipto quanto para o pinus, dão-lhes superioridade em relação a tal característica.

4.7 Análise Imediata

Os resultados da análise imediata dos resíduos são apresentados nas Tabelas 12 e 13 e nas Figuras 27 e 28.

Os resultados indicaram a interferência dos tratamentos térmicos sobre os parâmetros avaliados com a elevação das temperaturas. Observou-se, para os resíduos de eucalipto e pinus, importantes diminuições e aumentos, ambos significativos, nos teores de materiais voláteis (MV) e carbono fixo (CF), respectivamente, a partir de 220 °C. A maior incidência desse fato ocorreu à temperatura de 300 °C. Bridgeman et al. (2010), confirmam tal fato ao concluir em que, para as culturas energéticas torrificadas de salgueiro e *Miscanthus*, durante investigação do comportamento de pulverização, foi observada tendência de diminuição do teor de voláteis e do aumento do teor de carbono fixo, conforme aumento da temperatura e do tempo de residência do processo.

Tabela 12 - Análise imediata dos resíduos de eucalipto

Tratamento	Teores %					
	Cinza		Materiais voláteis		Carbono fixo	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	0,98 a	0,12	81,9 a	0,79	16,7 d	0,71
140 °C	0,91 a	0,80	81,9 a	0,63	17,2 d	0,57
180 °C	0,83 a	0,08	81,5 a	0,42	17,6 d	0,33
220 °C	0,94 a	0,03	74,6 b	0,45	24,4 c	0,45
260 °C	0,96 a	0,03	70,2 c	0,54	28,8 b	0,53
300 °C	0,99 a	0,01	52,7 d	0,60	46,3 a	0,60
F	0,2402 ^{n.s.}		2,2*10 ^{-16***}		2,2*10 ^{-16***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

^{n.s.} Não significativo.

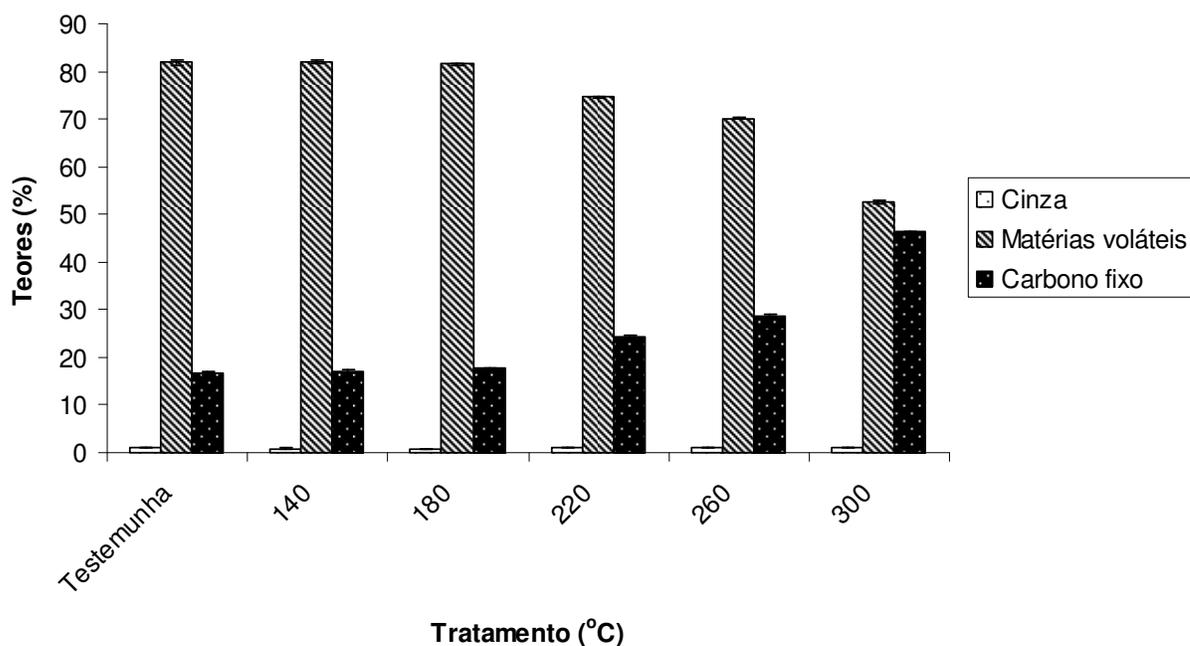


Figura 27 - Análise imediata dos resíduos de eucalipto. As barras indicam o erro padrão das médias

Tabela 13 - Análise imediata dos resíduos de pinus

Tratamento	Teores %					
	Cinza		Materiais voláteis		Carbono fixo	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
Testemunha	0,53 b	0,06	80,1 a	0,53	19,4 d	0,48
140 °C	0,46 b	0,03	80,1 a	0,42	19,4 d	0,39
180 °C	0,50 b	0,07	79,7 ab	0,59	19,9 d	0,53
220 °C	0,51 b	0,05	76,9 b	0,27	22,6 c	0,27
260 °C	0,64 ab	0,03	70,7 c	0,18	28,7 b	0,19
300 °C	0,84 a	0,11	53,4 d	1,27	45,7 a	0,17
F	0,0042**		2,2*10 ^{-16***}		2,2*10 ^{-16***}	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

**(*) Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

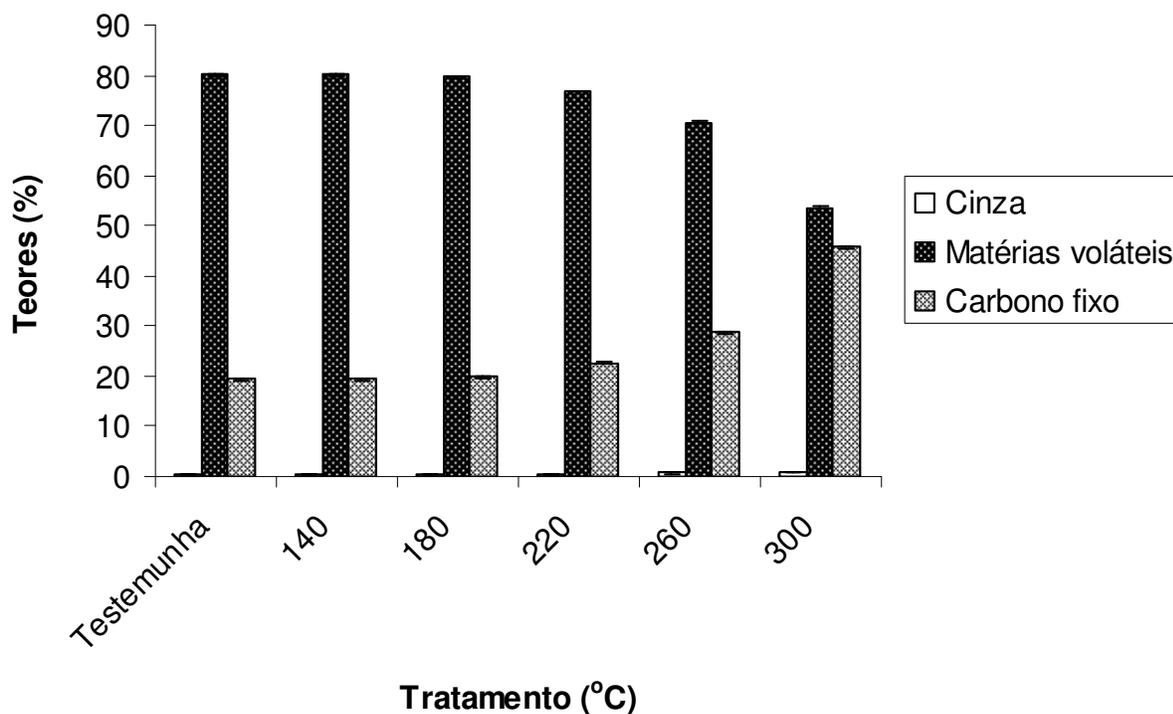


Figura 28 - Análise imediata dos resíduos de pinus. As barras indicam o erro padrão das médias

Durante a torrefação de biomassa Phanphanich e Mani (2011), afirmam que alguns dos compostos voláteis altamente reativos são removidos da mesma na forma de vapores, resultando em uma biomassa sólida, de cor marrom escuro, com maior densidade energética. Afirmam ainda que, durante o processo de torrefação, a biomassa perde cerca de 10-20% de sua massa através de conversão em gases voláteis e outros produtos químicos, que podem ser capturados e utilizados para gerar produtos químicos de valor agregado. Os mesmos autores, estudando as características de cavacos de pinus e resíduos de exploração madeireira torreficados, concluíram que o material volátil presente em ambas as amostras foi menos alterado à temperatura de 225 e 250 °C, enquanto notável redução foi observada em temperaturas de torrefação de 275 e 300 °C. Observação semelhante também foi encontrada no estudo de briquete de madeira torreficada e outros tipos de biomassa (FELFLI et al., 2005; PIMCHUAI; DUTTA; BASU, 2010).

Os valores observados na análise de materiais voláteis e de carbono fixo para os tratamentos testemunha, 140 e 180 °C, tanto para os resíduos de eucalipto como de pinus, encontram-se dentro da faixa indicada por Arola (1976) e Brito e Barrichelo (1982), que verificaram teores de materiais voláteis e de carbono fixo entre 75 e 85% e 15 e 25%, respectivamente. Os mesmos autores asseguram que combustíveis com altos teores de substâncias voláteis são mais fáceis de serem queimados e com maior rapidez, o inverso sendo esperado para combustíveis com elevados teores de carbono fixo.

A respeito do teor de cinzas, não houve variação nos resultados para os resíduos de eucalipto, mas foram evidenciadas influências dos tratamentos térmicos para os resíduos de pinus a 300 °C.

De acordo com Almeida, Brito e Perré (2010), o teor de cinzas das madeiras de *E. grandis*, *E. saligna* e *Corymbia citriodora* e suas cascas, tratadas termicamente a temperaturas variando entre 180 e 280 °C (com tempo de 1 e 5 horas) foi muito baixo (< 0,3% base seca), mas muito maior na casca (> 3,5% base seca), tendo-se concluído não haver influência da torrefação.

Os resultados encontrados estão abaixo dos relatados por Arola (1976), que constataram valores de 1 a 3% no teor de cinzas. O teor de cinzas é função da espécie

e da idade da madeira que lhe deu origem. Ele é mais elevado nas folhosas que nas coníferas, como de fato foi observado.

Importante ser mencionado que, em geral, os teores de cinzas na biomassa florestal são menores que os encontrados em resíduos agrícolas, dificultando, por razões quantitativas, a detecção de diferenças palpáveis de teor de cinzas em função do tratamento térmico.

Sadaka e Negi (2009), estudando resíduos de agricultura (palha de trigo, palha de arroz e resíduo de algodão descaroçado) observaram aumento do teor de cinzas com o aumento da temperatura de torrefação (25, 200, 260 e 315 °C), considerando-se 3 tempos de residência. Zanzi, Ferro e Torres (2002), também observaram aumento de 6% no teor de cinzas após a torrefação de pellets de palha por 3 horas a 280 °C. Conforme propõem Pimchuai, Dutta e Basu (2010), trabalhando com cascas de arroz e quatro outros resíduos agrícolas torrificados na faixa de 250-300 °C em nitrogênio, o teor de cinzas aumentou com a elevação da temperatura, mas principalmente diminuíram com o aumento do tempo de residência (1-2 horas).

Como regra geral, é desejável um material com baixo teor de cinzas, ou seja, com o mínimo de impurezas para uso como combustível. No caso específico dos materiais estudados, os mesmos podem ser considerados como aptos para tal aplicação em relação aos teores desses compostos.

Em termos práticos, segundo McKendry (2002), o teor de cinzas de uma biomassa afeta tanto o manuseio como os custos de processamento da conversão global de biomassa em energia. A energia disponível do combustível é reduzida em proporção à magnitude do teor de cinzas. Em processos de combustão, onde as cinzas podem reagir para formar uma "escória", uma fase líquida é formada em temperaturas elevadas, que podem reduzir o rendimento da fábrica e resultar em aumento dos custos operacionais.

4.8 Resistência à moagem (redução granulométrica)

A Tabela 14 apresenta os resultados de rendimento mássico dos resíduos de eucalipto e pinus tratados a temperaturas finais de 140, 220 e 300 °C. Os resultados indicaram que os rendimentos mássicos, tanto para os resíduos de eucalipto como para os resíduos de pinus, foram afetados pelas temperaturas de tratamento, sendo que todos os tratamentos mostraram diferenças significativas entre si. No caso, continuam sendo válidas as observações apresentadas no item 4.2.

Tabela 14 - Rendimento mássico dos resíduos florestais após o tratamento térmico

Tratamento	Rendimento mássico %			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Média ¹	Erro padrão	Média ¹	Erro padrão
140 °C	100,0 a	0,00	99,9 a	0,04
220 °C	86,7 b	0,23	92,3 b	0,27
300 °C	52,0 c	0,47	65,2 c	0,29
F	8672,4**		9129,1**	

¹ Médias de 5 repetições.

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade (Teste F).

Os resultados da análise granulométrica e do cálculo do tamanho médio dos resíduos (testemunha e termicamente tratados), antes e após a moagem, são apresentados nas Figuras de 29 a 32 e na Tabela 15. Especificamente, as Figuras 30 e 32 mostram um exemplo da quantidade de resíduos de eucalipto e pinus, respectivamente, retida em cada peneira utilizada no ensaio, demonstrando as diferenças observadas antes e após a moagem.

Como ocorrido no ensaio granulométrico do item 3.3.4, os resíduos de eucalipto e pinus também se comportaram diferentemente durante os ensaios, devido às

características intrínsecas da espécie como densidade da madeira, tipo de casca, etc., que induziram a influência de outros fatores como o tamanho e a forma dos resíduos picados.

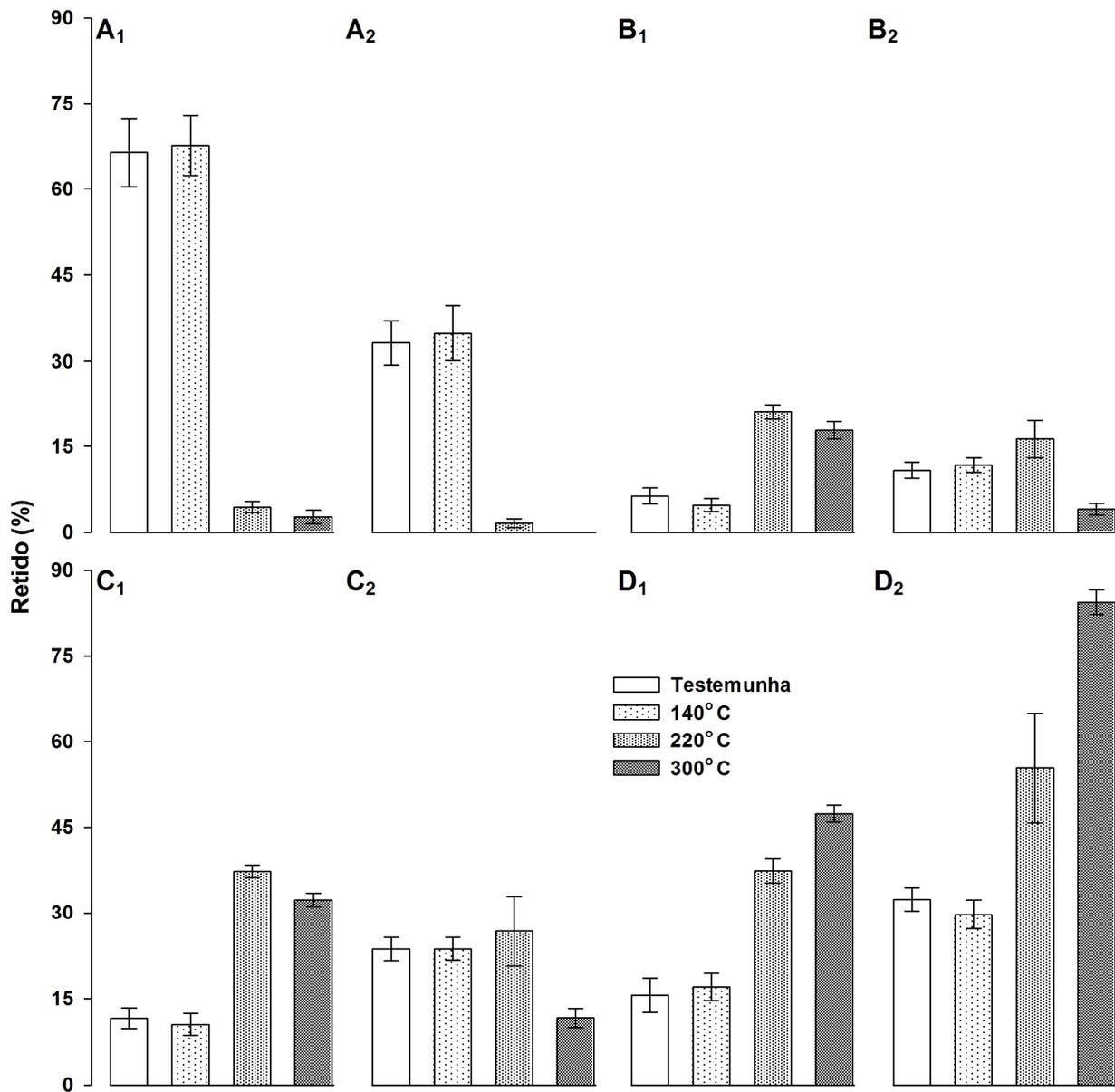


Figura 29 - Análise granulométrica dos resíduos de eucalipto (1) antes e (2) após a moagem nas peneiras de (A) 16,0 mm, (B) 8,0 mm, (C) 4,0 mm e (D) menor que 4,0 mm. As barras indicam o erro padrão das médias

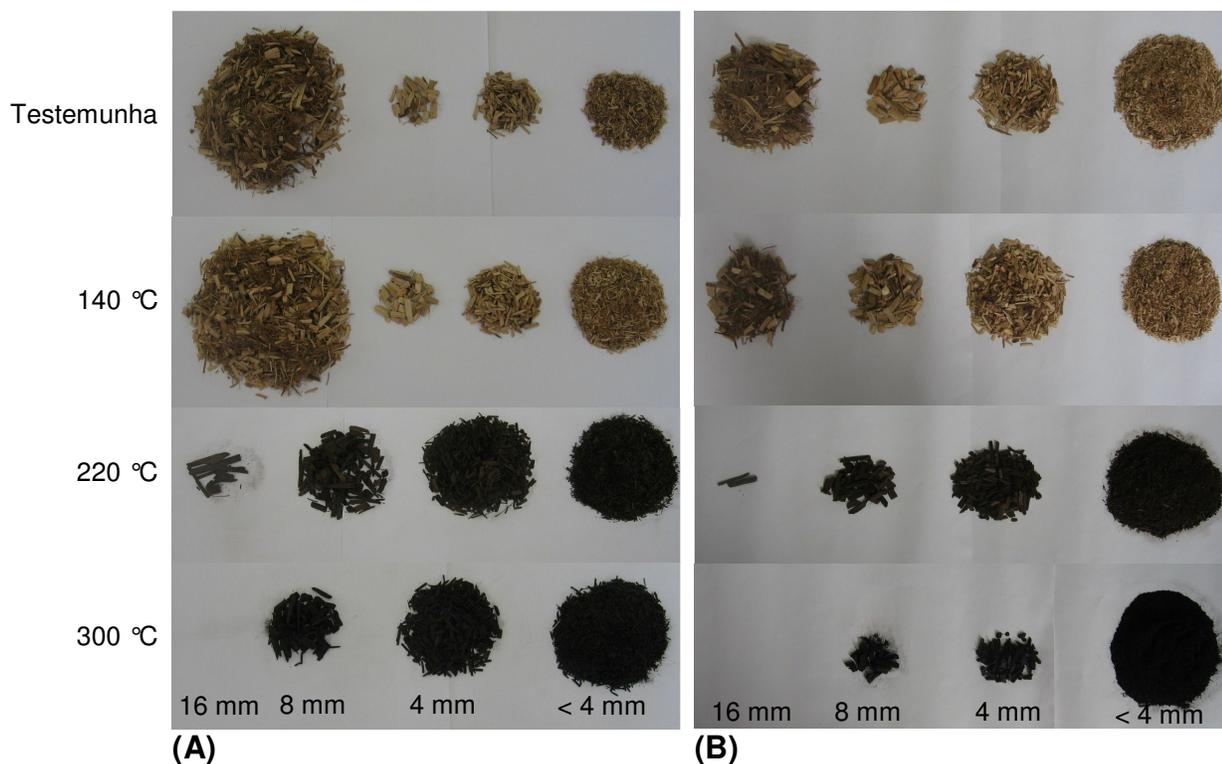


Figura 30 - Quantidades de resíduos de eucalipto retidas nas diferentes peneiras (A) antes e (B) após a moagem

Os resultados encontrados para análise granulométrica dos resíduos de eucalipto antes da moagem, mostraram que 66,5% dos materiais testemunha e 67,7% dos materiais tratados a 140 °C ficaram retidos na primeira peneira, ou seja, a de maior malha, com abertura de 16 mm. Essa retenção se deu, principalmente, devido ao emaranhado formado pelas cascas que dificultava a passagem das partículas de tamanhos menores para as peneiras subseqüentes. Tal fato também ocorreu mesmo após a moagem, embora a retenção na primeira peneira tenha caído para a metade (33,2% para a testemunha e 34,9% para o tratamento a 140 °C). Tal situação não ocorreu para os tratamentos a 220 e 300 °C pelo fato de que, a tais temperaturas, a casca sofreu alterações termodegradativas reduzindo, assim, a presença de emaranhados.

Ainda para os resíduos de eucalipto, observou-se que para as mesmas condições de moagem, os materiais tratados sofreram uma transformação mais intensa que o material “in natura” (testemunha), principalmente aqueles obtidos a 300 °C.

Nesse caso, 84,4% do material foi reduzido a partículas com tamanhos inferiores a 4,0 mm resultando, portanto, num material final na forma de pó. Este fato pode ser associado ao comportamento frágil e à redução da resistência mecânica dos materiais tratados termicamente, facilitando sua moagem, tendo como referência os estudos de Rapp, Brischke e Welzbacher (2006).

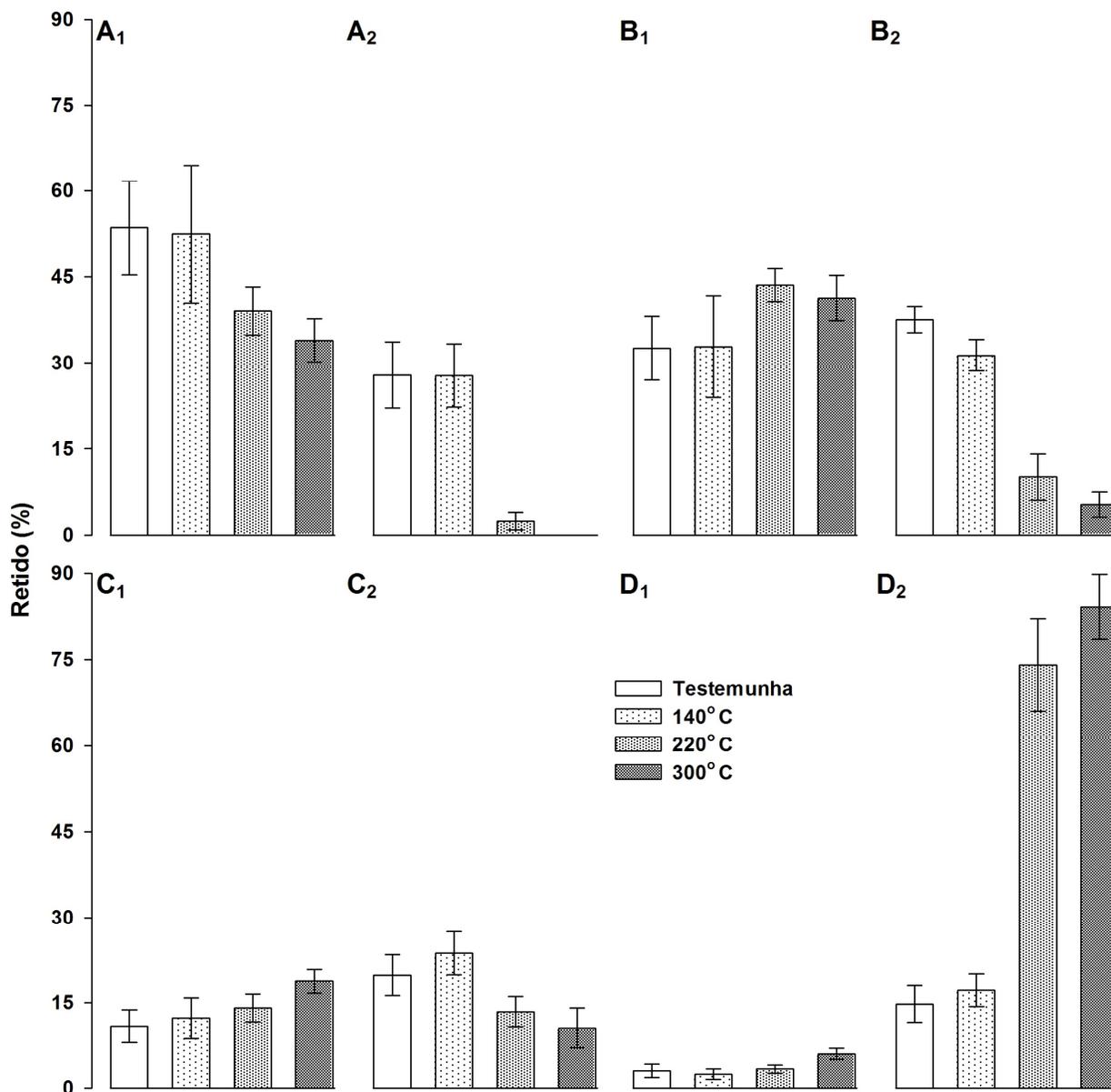


Figura 31 - Análise granulométrica dos resíduos de pinus (1) antes e (2) após a moagem nas peneiras de (A) 16,0 mm, (B) 8,0 mm, (C) 4,0 mm e (D) menor que 4,0 mm. As barras indicam o erro padrão das médias

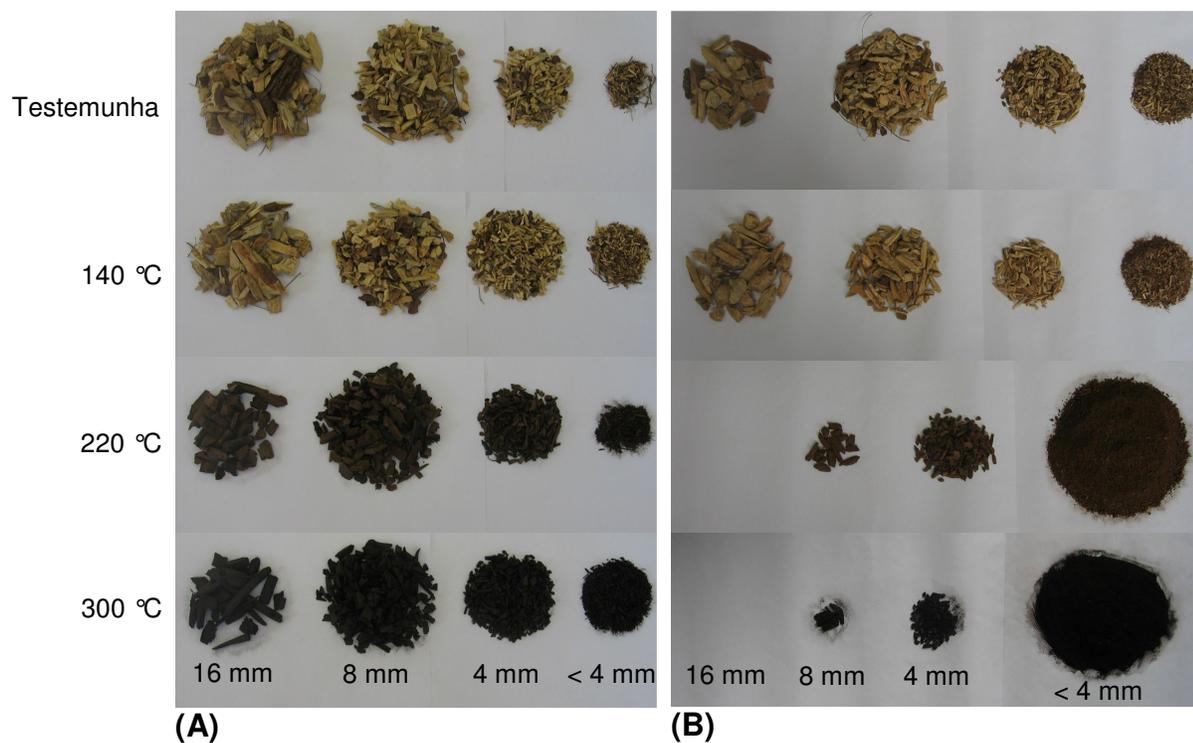


Figura 32 - Quantidades de resíduos de pinus retidas nas diferentes peneiras (A) antes e (B) após a moagem

Tabela 15 - Tamanho médio dos resíduos florestais antes e após a moagem

Tratamento	Tamanho médio mm			
	Resíduos de eucalipto		Resíduos de pinus	
	Antes da moagem ¹	Depois da moagem ¹	Antes da moagem ¹	Depois da moagem ¹
Testemunha	9,8 (0,40) a	7,4 (0,25) a	11,0 (0,28) a	9,3 (0,53) a
140 °C	9,7 (0,34) a	7,6 (0,33) a	11,0 (0,29) a	8,9 (0,48) a
220 °C	6,0 (0,17) b	4,9 (0,62) b	10,5 (0,22) a	3,8 (0,65) b
300 °C	5,3 (0,16) b	2,9 (0,14) c	10,3 (0,20) a	3,0 (0,35) b

¹ Médias de 5 repetições seguidas de erro padrão entre parêntesis. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade (teste de Tukey).

A diminuição da granulometria dos resíduos de eucalipto devido aos tratamentos térmicos levou à redução significativa do tamanho médio das partículas, inclusive após a moagem, sendo isto também mais fortemente observado à temperatura de 300 °C. Comparando-se com os materiais antes da moagem, as reduções sofridas nos tamanhos médios foram, respectivamente, de 24,7%, 21,6%, 25,0% e 45,3% para a testemunha e as temperaturas de 140, 220 e 300 °C.

Em relação aos resíduos de pinus, observou-se que, antes da moagem, as maiores porcentagens de retenção de material, tanto para a testemunha como para os termicamente tratados, se encontravam nas peneiras de abertura de malha 16 e 8 mm. No caso, ficaram retidos nessas duas primeiras peneiras 86,1%, 85,3%, 82,7% e 75,3%, respectivamente, para o material testemunha e materiais obtidos nas temperaturas de 140, 220 e 300 °C. Apesar da menor escala, repetiu-se também o mesmo fato na distribuição granulométrica após a moagem, ou seja, 65,5% de retenção para a testemunha e 59,1% para o material tratado a 140 °C.

Na análise granulométrica dos resíduos de pinus, após a moagem, o destaque ficou por conta das temperaturas de tratamento a 220 e 300 °C, cujos materiais sofreram uma transformação mais intensa que o material “in natura”. Os resultados indicaram maior fragmentação dos materiais tratados que o material testemunha, principalmente a 300 °C. Houve uma redução drástica do tamanho do material, que se concentrou em larga proporção nas dimensões abaixo de 4,0 mm (74,1% e 84,2% para as temperaturas de 220 e 300 °C) caracterizando-se pela forma visual de pó.

Desse modo, com a diminuição da granulometria dos resíduos de pinus devido aos tratamentos térmicos, houve uma redução significativa do tamanho médio das partículas, sobretudo após a moagem, sendo isto mais evidenciado às temperaturas de 220 e 300 °C. Comparando-se com os materiais antes da moagem, as reduções dos tamanhos médios foram, respectivamente, de 15,5%, 19,1%, 63,8% e 70,9% para a testemunha e as temperaturas de 140, 220 e 300 °C.

De modo geral, o comportamento dos materiais tratados de eucalipto e pinus apresentado durante o ensaio de granulometria antes e após a moagem, principalmente a 300 °C e a 220-300 °C para o eucalipto e pinus, respectivamente, mostrou evidências da degradação de elementos constituintes da parede celular decorrentes do tratamento

térmico. A perda de constituintes da parede celular resultou, conseqüentemente, em maior friabilidade do material tratado termicamente. Essa decomposição de elementos da parede em função da temperatura foi observada por Ishimaru et al. (2007). Esses autores constataram a perda total da estrutura lamelar por meio da decomposição de elementos da parede celular da madeira após carbonização de 700 °C, em estudo da micro-estrutura de carvão vegetal.

4.9 Microscopia eletrônica

As Figuras 33 e 34 mostram imagens feitas com microscópio eletrônico de varredura ambiental (MEVA). Estas imagens refletem a forma adquirida das partículas dos resíduos de eucalipto e pinus tratados termicamente a 220 e 300 °C, após a moagem. Observou-se uma diminuição de tamanho das partículas, para ambas as espécies, com o aumento da temperatura de tratamento térmico, sobretudo nos materiais tratados a 300 °C. Para Bergman et al. (2005), o efeito do tratamento térmico conduz, em primeiro plano, a uma diminuição tanto em comprimento quanto em diâmetro dos materiais, sendo que, aparentemente, mais partículas esféricas são produzidas. Govin et al. (2009), destacam que o diâmetro das partículas obtidas após a moagem é dependente da temperatura de torrefação, ou seja, quanto maior a temperatura, mais finas são as partículas.

Constatou-se também nas imagens que, mesmo após o tratamento térmico, a natureza anisotrópica da madeira de eucalipto e de pinus é mantida. Devido à estrutura fibrosa da madeira, as partículas são maiores na direção longitudinal, como demonstrado nas Figuras 33A e 34A, referentes ao tratamento 220 °C, com partículas superiores a 1 mm de comprimento. Comportamentos esféricos e anisotrópicos foram igualmente observados em amostras de *Fagus sylvatica* e *Pinus pinaster* após tratamento térmico (ALMEIDA et al., 2009). Salienta-se que os materiais testemunha, sem tratamento térmico, obtidos após a moagem apresentaram aspecto fusiforme, mesmo os materiais passados pela peneira mais fina.

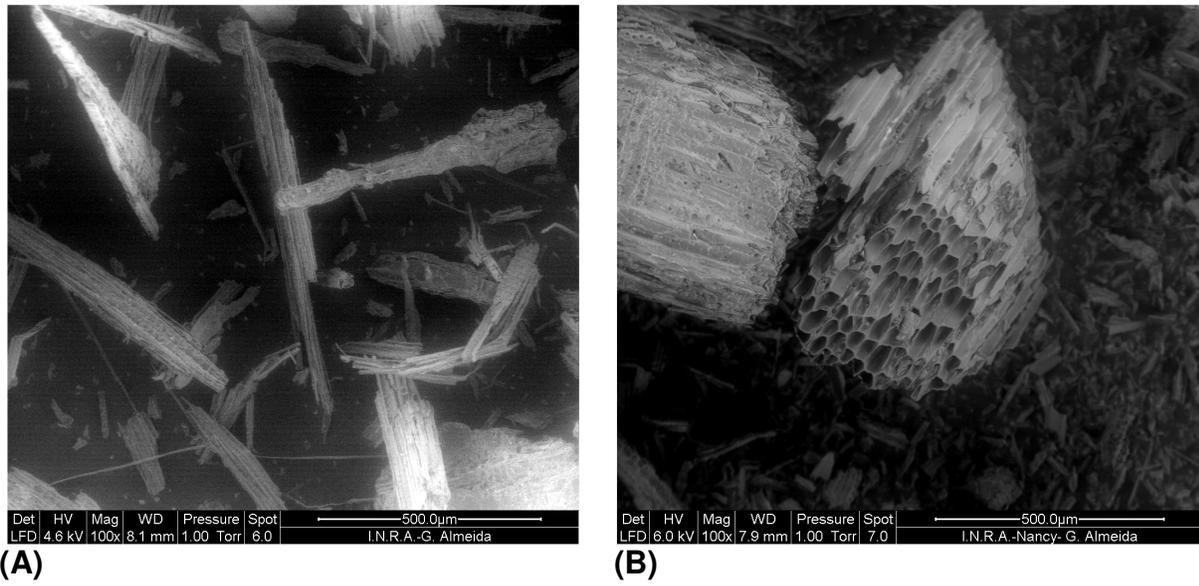


Figura 33 - Alterações morfológicas nos materiais de eucalipto tratados a (A) 220 °C e (B) 300 °C analisados através de microscopia eletrônica (MEVA)

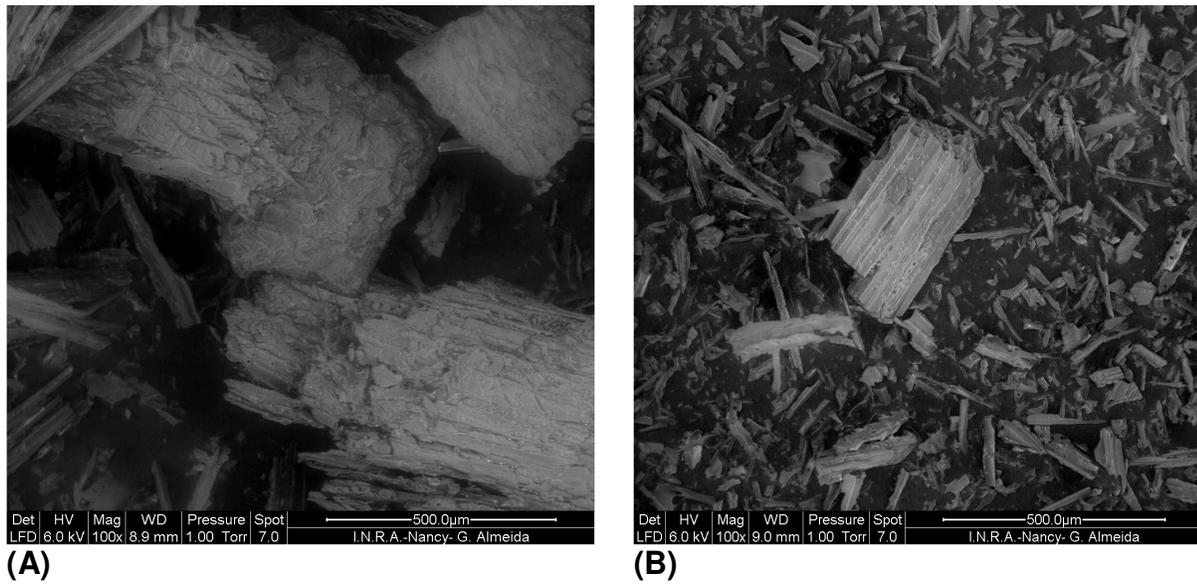


Figura 34 - Alterações morfológicas nos materiais de pinus tratados a (A) 220 °C e (B) 300 °C analisados através de microscopia eletrônica (MEVA)

5 CONCLUSÕES

- √ Os tratamentos térmicos exerceram influência nos rendimentos mássicos, tanto para os resíduos de eucalipto como para os resíduos de pinus, com redução dos valores devido ao acréscimo da temperatura. O rendimento foi maior para os resíduos de pinus a partir de 180 °C, em comparação ao do eucalipto.
- √ A densidade a granel, para ambas as espécies, foi afetada pelas temperaturas de tratamento, com queda acentuada a 300 °C, mas sem que os resultados se situassem fora das faixas normalmente detectadas para cavacos de madeira e carvão vegetal.
- √ Reportando-se à determinação granulométrica, observou-se que os materiais de eucalipto e de pinus se comportaram diferentemente nos ensaios. A influência exercida pelo tratamento térmico foi mais evidente a partir de 220 °C, principalmente no caso dos resíduos de eucalipto, por apresentarem maior fragmentação dos materiais tratados em comparação ao material testemunha, principalmente a 300 °C.
- √ Para os resíduos de eucalipto e pinus, houve redução do tamanho médio das partículas devido aos tratamentos térmicos, sendo isto mais fortemente observado à temperatura de 300 °C, principalmente para os materiais de eucalipto.
- √ Para os resíduos das duas espécies, houve aumento do poder calorífico superior conforme a elevação da temperatura de tratamento, com significância a partir de 220 °C. Exceto no tratamento a 300 °C, os valores obtidos de poder calorífico superior do pinus foram superiores aos do eucalipto. Foi constatado também, a 300 °C, um ganho energético maior do que nos demais tratamentos, levando-se em consideração o poder calorífico superior da testemunha, principalmente para os resíduos de eucalipto (37,8%).

- √ Observou-se, para os resíduos de ambas as espécies, tendências para que, com o aumento das temperaturas de tratamento, houvesse aumento no índice de combustão com destaque para o tratamento a 300 °C.
- √ Os resultados de análise imediata sofreram influência dos tratamentos térmicos. Observaram-se tendências para a redução e para o aumento dos valores de materiais voláteis e carbono fixo, respectivamente, com a elevação das temperaturas de tratamento, sendo isto mais evidente a 300 °C. A respeito do teor de cinzas, houve variação nos resultados apenas para os resíduos de pinus a 300 °C, deduzindo-se que os tratamentos térmicos interferiram nos valores obtidos.
- √ No ensaio de resistência à moagem, as temperaturas de tratamento térmico alteraram a distribuição granulométrica dos resíduos de eucalipto e pinus.
- √ Após a moagem, houve um relevante aumento da quantidade de material de baixa granulometria (menor que 4 mm), sendo isto mais expressivo para a temperatura de 300 °C, onde 84,4% e 84,2% do material foi assim transformado, respectivamente, para os resíduos de eucalipto e pinus.
- √ Na comparação antes e após a moagem, tanto para os resíduos de eucalipto como para os resíduos de pinus, observou-se tendência no decréscimo do tamanho médio das partículas com o aumento da temperatura, sobretudo após a moagem, sendo isto mais expressivo às temperaturas de 300 °C e 220-300 °C para os materiais de eucalipto e pinus, respectivamente.
- √ Os resultados indicaram uma maior facilidade de moagem (maior friabilidade) dos materiais após os tratamentos térmicos, comparativamente aos materiais “in natura”.
- √ Com base nas imagens de microscopia eletrônica em amostras de ambas as espécies tratadas a 220 e 300 °C após a moagem, observou-se alterações

morfológicas provocadas pelo tratamento térmico, gerando partículas com menores diâmetro e mais esféricas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2002. 153 p.

_____. **Documentos**: Leilão 005/2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/052010_Resultado_2011.pdf>. Acesso em: 28 set. 2010.

AGRAWAL, R.K. **Kinetics of biomass and coal pyrolysis**. Clarson: Clarson University, 1984. 183 p.

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Changes in wood-water relationship due to heat treatment assessed on micro-samples of three *Eucalyptus* species. **Holzforschung**, Berlin, v. 63, p. 80-88, 2009.

_____. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, n. 24, p. 9778-9784, 2010.

ALMEIDA, G.; HUBER, F.; PIERRE, F.; PERRE, P. **Observation des faciès de rupture des particules obtenues après broyage**. Nancy: ANR TORBIGAP, 2009. 21 p.

ARCATE, J. Marchés et technologies pour le bois torréfié en 2002. **Bois Energie**, Paris, v. 6, 2002.

ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M.G.; RUBIERA, F.; PIS, J.J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 89, p. 169-175, 2008.

AROLA, R.A. **Wood fuels - how do they stack up?** Atlanta: Forests Products Research Society, 1976. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2 p.

_____. **NBR 7402**: carvão vegetal - determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982. 5 p.

_____. **NBR 8633**: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 2 p.

_____. **NBR 8112**: carvão vegetal - análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS.
Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010. Brasília, 2011. 130 p.

AVAT, F. **Contribution a l'etude des traitements thermiques du bois (20-300 C):** transformations chimiques et caracterisations physico-chimiques. Saint-Etienne: Ecole Nationale Superieure des Mines de Saint-Etienne, 1993. 237 p.

BAUER, S.R.T. **Resíduos da exploração florestal de *Eucaliptus grandis* Hill Ex Maiden para geração de energia elétrica.** 2001. 54 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

BAUMBERGER, S.; DOLE, P.; LAPIERRE, C. Using transgenic poplars to elucidate the relationship between the structure and the thermal properties of lignins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 50, n. 8, p. 2450-2453, 2002.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, p. 539-546, 2003.

BERGMAN, P.C.A.; KIEL, J.H.A. Torrefaction for biomass upgrading. In: EUROPEAN BIOMASS CONFERENCE & EXHIBITION, 14., 2005, Paris. **Proceedings...** p. 17-21.

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. Torrefaction for entrained flow gasification of biomass. In: WORLD BIOMASS CONFERENCE, 2., 2004, Rome. Rome: ETA-Florence and WIP-Munich; 2004. p. 679-682

BERGMAN, P.C.A.; BOERSMA, A.R.; KIEL, J.H.A.; PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. **Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass.** 2005. 50 p. (Report ECN-C--05-067). Disponível em: <www.ecn.nl/biomass>. Acesso em: 11 nov. 2010.

BHUIYAN, M.T.R.; HIRAI, N. Study of crystalline behavior of heat-treated wood cellulose during treatments in water. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 51, n. 1, p. 42-47, 2005.

BOONSTRA, M.J.; TJEERDSMA, B.F.; GROENEVELD, H.A.C. **Thermal modification of non-durable wood species. 1.** The PLATO technology: thermal modification of wood. International Research Group on Wood Preservation, 1998. (Document, IRG/WP 98-40123).

BORREGA, M.; KÄRENLAMPI, P.P. Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Heidelberg, v. 66, n. 8, p. 63-69, 2007.

BRAND, M.A.; MUÑIZ, G.I.B. de. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 88, p. 619-628, dez. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira: exercício de 2010 (preliminar)**. Brasília, 2011. 27 p.

BRIDGEMAN, T.G.; JONES, J.M.; SHIELD, I.; WILLIAMS, P.T. Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. **Fuel**, Guildford, v. 87, p. 844-856, 2008.

BRIDGEMAN, T.G.; JONES, J.M.; WILLIAMS, A.; WALDRON, D.J. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. **Fuel**, Guildford, v. 89, p. 3911-3918, 2010.

BRITO, E.O. Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação. **Revista Floresta**, Curitiba, ano 4, n. 26, p. 34-39, 1996.

BRITO, J.O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. **Silvicultura**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 41, p. 188-193, 1986.

_____. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise**. 1992. 83 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

_____. Estudo preliminar de retificação térmica da madeira de eucalipto. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS, SBEF, 1993. p. 774.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, Piracicaba, n. 16, p. 63-70, jun. 1978.

_____. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **IPEF. Circular Técnica**, Piracicaba, n. 52, 1979.

_____. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 1982. p. 101-137.

BRITO, J.O.; CINTRA, T.C. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão estratégia e demandas de ações. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004.

BRITO, J.O.; SILVA, F.G.; LEÃO, M.M.; ALMEIDA, G. Chemical composition changes in eucalyptus and pinus woods submitted to heat treatment. **Bioresource Technology**, Essex, v. 99, n. 18, p. 8545-8548, Dec. 2008.

CHEN, W.-H.; KUO, P.-C. A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. **Energy**, Oxford, v. 35, p. 2580-2586, 2010.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMES, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. da UNICAMP, 2008. 728 p.

COUTO, H.T.Z. do; BRITO, J.O.; TOMAZELLO FILHO, M.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E.C.M. Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de *Eucalyptus saligna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 16, p. 19-23, abr. 1984.

COUTO, L.C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

CRUZ, P.T.A.; NOGUEIRA, M.F.M. Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 37-44, jan./mar. 2004.

DOAT, J. Un nouveau produit énergétique pour les pays en développement. Le bois torréfié. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, Montpellier, n. 208, p. 57-67, 1985a

_____. CTFT Research into wood pyrolysis. In: SYMPOSIUM FOREST PRODUCTS RESEARCH INTERNATIONAL ACHIEVEMENT AND THE FUTURE, 1985b. p. 12-24.

DUCHEZ, L.; GUYONNET, R. **Principles and applications of wood rectification**. Disponível em: <<http://techtp.com/twopapers/fao>>. Acesso em: 20 mar. 2002.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2010**: ano base 2009. Rio de Janeiro, 2010. 276 p.

EMSLEY, A.M.; STEVENS, G.C. Review: kinetics and mechanisms of the low-temperature degradation of cellulose. **Cellulose**, London, v. 1, p. 26-56, 1994.

ESTEVEZ, B.; GRACA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 62 n. 3, p. 344-351, 2008.

ESTEVEZ, B.M.; PEREIRA, H.M. Wood modification by heat treatment: A review. **BioResources**, Essex, v. 4, n. 1, p. 370-404, 2009.

FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Rome, 1990. 130 p. (FAO. Forestry Paper, 93).

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth) e aspectos gerais de combustão. **Série Técnica FUFPEF**. Curitiba, n. 6, p. 14, 1981.

FELFLI, F.; LUENGO, C. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v. 9, n. 3, p. 19-22, 2005.

FELFLI, F.F.; LUENGO, C.A.; SOLER, P.B. Torrefação da biomassa: características, aplicações e perspectivas. In: ENCONTRO SOBRE ENERGIA MEIO RURAL, 3., 2000, Cidade. **Anais...**

FELFLI, F.F.; LUENGO, C.A.; SUAREZ, J.A.; BEATÓN, P.A. Wood briquette torrefaction. **Energy for Sustainable Development**, Bangalore, v. 9, n. 3, p. 19-22. Sept. 2005.

FERRO, D.T.; VIGOUROUX, V.; GRIMM, A.; ZANZI, R. Torrefaction of agricultural and forest residues. In: CUBASOLAR 2004. Guantánamo, Cuba, 2004.

GARDNER, D.J.; SCHULTZ, T.P.; MCGINNIS, G.D. The pyrolytic behavior of selected lignin preparations. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, Philadelphia, v. 5, n. 1, p. 85-110, 1985.

GOHAR, P.; GUYONNET, R. Development of wood rectification process at the industrial stage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD PRESERVATION, 4., 1998, Cannes. **Resumes...** Cannes: IRG, 1998. p. 173-178.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: EDUSP, 2003. 226 p.

GOVIN, A.; REPELLIN, V.; GUYONNET, R.; ROLLAND, M.; DUPLAN, J-L. Effect of torrefaction on grinding energy requirement for thin wood particle production. **Récents Progrès en Génie des Procédés**, Paris, n. 98, p. 756-1-756-6, 2009.

GRAUER, A.; KAWANO, M. Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável. **Revista da Madeira**, n. 110, 2008. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento%20de%20res%C3%ADuos%20para%20biomassa%20%C3%A9%20rent%C3%A1vel)>. Acesso em: 10 maio 2008.

GUEDIRA, F. **Pyrolise lente de la biomasse**: comportement compare des tourteux d olives, de la bagasse de canne a sucre et la sciure de bois (Pin maritime). 1988. 122 p. Thèse (Docteur) - Université Mohamed, Maroc, 1988.

HAKKOU, M.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P.; ZOULALIAN A. Investigations of the reasons for fungal durability of eat-treated beech wood. **Polymer Degradation and Stability**, Barking, v. 91, p. 393-397, 2006.

INARI, G.N.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P. Chemical reactivity of heat-treated wood. **Wood Science & Technology**, New York, v. 41, n. 2, p. 157-168, 2007.

INCE, P.J. **Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents**. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977. 9 p. (Gen. Tech. Report FPL, 13).

ISHIMARU, K.; HATA, T.; BRONSVELD, P.; IMAMURA, Y. Microstructural study of carbonized wood after cell wall sectioning. **Journal of Materials Science**, London, v. 42, n. 8, p. 2662-2668, 2007.

JANNUZZI, G.M. Uma avaliação das atividades recentes de P&D em energia renovável no Brasil e reflexões para o futuro. **Energy Discussion Paper**, Campinas, n. 2.64-01/03, p. 1-12, 2003.

JINGGE, L.; JOHN, G. **Evaluation of woody biomass torrefaction**. Rotorua: Forest Research, 2001.

KAILA, P. Architecture en Finlandia: tecnologia de la construcción: los paneles. **Revista Internacional para la Industria Maderera para Latino América**, v. 19, n. 202, p. 8-19, mayo 1999.

KAMDEM, D.P.; PIZZI, A.; JERMANNAUD, A. Durability of heat-treated wood. **Holz Roh Werkst**, Heidelberg, v. 60, p. 1-6, 2002.

KOEHLER, A. **Causes of brashness in wood**. Washington: USDA, 1933. (FPL Technical Bulletin, 342).

KOUFOPANOS, C.A.; LUCCHESI, A.; MASCHIO, G. Kinetic modelling of the pyrolysis of biomass and biomass component. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa, v. 67, n. 1, p. 75-84, 1989.

KUBOJIMA, Y.; OKANO, T.; OHTA, M. Bending strength and toughness of heat-treated wood. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 46, n. 1, p. 8-15, 2000.

LI, X.; CAI, Z.; MOU, Q.; WU, Y.; LIU, Y. Effects of heat treatment on some physical properties of Douglas Fir (*Pseudotsuga Menziesii*) Wood. **Advanced Materials Research**, v. 197/198, p. 90-95, 2011. Disponível em: <www.scientific.net>. Acesso em: 13 jun. 2011.

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. Pirólise e torrefação da biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. da UNICAMP, 2008. cap. 10, p. 333-352.

McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.

MILITZ, H. **Thermal treatment of wood**: European processes and their background. Stockholm: The International Research Group on Wood Preservation, 2002. (IRG/WP 02-40241).

MOURAS, S.; GIRARD, P.; ROUSSET, P.; PERMADI, P.; DIROL, D.; LABAT, G. Propriétés physiques de bois peu durables soumis à un traitement de pyrolyse ménagée. **Annals of Forest Science**, Washington, v. 59, n. 3, p. 317-326, 2002.

MUNALULA F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorific value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 33, p. 415-420, 2009.

NEVELL, T.P.; ZERONIAN, S.H. **Cellulose chemistry and its applications**. New York: Ed. E.H. Limited, 1985. 552 p.

NGUILA INARI, G.; PETRISSANS, M.; GERARDIN, P. Chemical reactivity of heat-treated wood. **Wood Science and Technology**, Heidelberg, v. 41, n. 2, p. 157-168, 2007.

NIMLOS, M.N.; BROOKING, E.; LOOKER, M.J.; EVANS, R.J. Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer. **Fuel Chemistry Division Preprints**, v. 48, n. 2, p. 590-591, 2003.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

NOLASCO, A.M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta - *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.**: caracterização e perspectivas. 2000. 171 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

_____. Análise quantitativa dos resíduos da extração e processamento da caixeta (*Tabebuia cassinoides*) no Vale do Ribeira-SP. In: WORKSHOP SUL-AMERICANO SOBRE USOS ALTERNATIVOS DE RESÍDUOS DE ORIGEM FLORESTAL E URBANA, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Embrapa Florestas, 1997. p. 113-116.

NURMI, J. Measurement and evaluation of wood fuel. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 2, n. 1/6, p. 157-171, 1992.

_____. The effect of whole-tree storage on the fuelwood properties of short-rotation *Salix crops*. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 8, n. 4, p. 245-249, 1995.

ORFÃO, J.J.M.; ANTUNES, F.J.A.; FIGUEIREDO, J.L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. **Fuel**, Guildford, v. 78, n. 3, p. 349-358, 1999.

PEDRAZZI, C.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. de; MUGUET, M.C.S.; GOMIDE, J.L. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de polpas produzidas por novas sequências de branqueamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 123-135, jan./mar. 2010.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. v. 1, 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PEREIRA JR., V.P. **Alternativas para a co-geração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira**. 2001. 100 p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

PÉREZ, S.; RENEDO, C.J.; ORTIZ, A.; MAÑANA, M. Energy potential of waste from 10 forest species in the North of Spain (Cantabria). **Bioresource Technology**, New York, v. 99, n. 14, p. 6339-6345, 2008.

PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P.; EL BAKALI, I.; SERRAJ, M. Wettability of heat-treated wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 57, n. 3, p. 301-307, 2003.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 102, p. 1246-1253, 2011.

PHUONG, L.X.; SHIDA, S.; SAITO, Y. Effects of heat treatment on brittleness of *Styrax tonkinensis* wood. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 53, n. 3, p. 181-186, 2007.

PIERRE, F.; ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Influence of torrefaction on some chemical and energy properties of Maritime Pine and Pedunculate Oak. **BioResources**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p. 1204-1218, 2011.

PIMCHUAI, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. **Energy Fuels**, Guildford, v. 24, p. 4638-4645, 2010.

PINCELLI, A.L.P.S.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. Avaliação da termorretificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 61, p. 122-132, jun. 2002.

PONCSAK, S.; KOCAEFE, D.; BOUAZARA, M.; PINCHETTE, A. Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). **Wood Science & Technology**, Heidelberg, v. 40, n. 8, p. 647-663, 2006.

POTTIE, M.A.; GUIMIER, D.Y. **Preparation of forest biomass for optimal conversion**. Canada: FERIC/IEA, 1985. 112 p. (FERIC Special Report SR-32/IEA Cooperative Project CPC3).

PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F. Torrefaction of wood - Part 1. Weight loss kinetics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 77, p. 28-34, 2006.

QUIRINO, W.F. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. 1991. 74 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

_____. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: Via Brasil, 2002. v. 1, 32 p.

QUIRINO, W.F.; BRITO, J.O. **Características e índices de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: IBAMA, LPF, 1991. 18 p. (Série Técnica, 13).

QUIRINO, W.F.; VALE, A.T. do; ANDRADE, A.P.A. de; ABREU, V.L.S.; AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

RAMOS E PAULA, L.E. de; TRUGILHO, P.F.; REZENDE, R.N.; ASSIS, C.O. de; BALIZA, A.E.R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p.103-112, abr./jun. 2011.

RAPP, A.O.; BRISCHKE, C.; WELZBACHER, C.R. Interrelationship between the severity of heat treatments and sieve fractions after impact ball milling: a mechanical test for quality control of thermally modified wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 60, p. 64-70, 2006.

ROUSSET, P. **Choix et validation expérimentale d'un modèle de pyrolyse pour le bois traité par haute température: de la microparticule au bois massif**. Nancy: Sciences Forestières et du Bois, 2004. 180 p.

ROUSSET, P.L.A.; PERRÉ, P.; GIRARD, P. Modification of mass transfer properties in poplar wood (*Populus robusta*) by a thermal treatment at high temperature. **Holz Roh Werkst**, v. 62, p. 113-119, 2004.

ROUSSET, P.; DAVRIEUX, F.; MACEDO, L.; PERRÉ, P. Characterisation of the torrefaction of beech wood using NIRS: Combined effects of temperature and duration. **Biomass and Bioenergy**, London, v. 35, p. 1219-1226, 2011.

ROUSSET, P.; LAPIERRE, C.; POLLET, B.; QUIRINO, W.; PERRE, P. Effect of severe thermal treatment on spruce and beech wood lignins. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 66, n. 1, p. 110p1-110p8, 2009.

SADAKA, S.; NEGI, S. Improvements of biomass physical and thermochemical characteristics via torrefaction process. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, Amsterdam, v. 28, n. 3, p. 427-434, Oct. 2009.

- SANTOS, D.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I. Materiais e energia. Convenção termoquímica de combustíveis. **Corrosão e Protecção de Materiais**, v. 29, n. 3, p. 78-90, 2010.
- SANTOS, J.A. Mechanical behavior of eucalyptus wood modified by heat. **Wood Science and Technology**, New York, v. 34, n. 1, p. 39-43, 2000.
- SHAFIZADEH, F.; BRADBURY, A.G.W. Thermal degradation of cellulose in Air and Nitrogen at low temperature. **Journal of Applied Polymer Science**, New York, v. 23, p. 1431-1441, 1979.
- SHI, J.L.; KOCAEFE, D.; ZHANG, J. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Heidelberg, v. 65, n. 4, p. 255-259, 2007.
- SILVA, C.R.A. da; GARRAFA, M.T.F.; NAVARENHO, P.L.; GADO, R.; YOSHIMA, S. A biomassa como alternativa energética para o Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, n. 12, p. 25-36, 2004.
- SILVA, M.G. da; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M.M.; NAGAISHI, T.Y.R.; GALVÃO, G.R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.
- SILVA, P.H.M.; GARCIA, J.N.; BRITO, J.O. Modificações ocasionadas pela termorreificação na madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA E PRODUTOS A BASE FLORESTAL, 1., 2004, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2004.
- SIVONEN, H.; MAUNU, S.L.; SUNDHOLM, F.; JÄMSÄ, S.; VIITANIEMI, P. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. **Holzforschung**, Berlin, v. 56, n. 6, p. 648-654, 2002.
- SOARES, R.V.; HAKKILA, P. Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no Estado do Paraná, Brasil. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 17, n. 1/2, p. 73-94, 1987.
- TANOUE, K-I.; HINAUCHI, T.; OO, T.; NISHIMURA, T.; TANIGUCHI, M.; SASAUCHI, K-I. Modeling of heterogeneous chemical reactions caused in pyrolysis of biomass particles. **Advanced Powder Technology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 825-840, 2007.
- TEIXEIRA, D. **Estado de la información sobre madera para energia**. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/006/ad399s/AD399s07.htm>>. Acesso em: 03 jun. 2011.
- TEIXEIRA, F.N.; LORA, E.E.S. Suprimento energético para termelétricas. In: LORA, E.E.S.; NASCIMENTO, M.A.R. **Geração termelétrica**: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 1, cap. 2, p.31-86.

THÖRNQVIST, T. **Projekt storskalig säsongslagring av trädbränsle - en sammanfattning av etapp 1. Large-scale seasonal storage of tree fuel project - summary of phase 1.** Sweden: The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Products, 1986. 50 p. (Report, 188).

_____. Drying and storage of forest residues for energy production. **Biomass**, London, v. 7, p. 125-134, 1985.

TJEERDSMA, B.F.; STEVENS, M.; MILITZ, H.; VAN ACKER, J. Effect of process conditions on moisture content and decay-resistance of hydro-thermally treated wood. **Holzforschung und –Verwertung**, Berlin, v. 5, p. 94-99, 2002.

TJEERDSMA, B.F.; BOONSTRA, M.; PIZZI, A.; TEKELY, P.; MILITZ, H. Characterization of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement. **Holz als Roh- und Werkstoff**, Heidelberg, v. 56, p. 149-153, 1998.

VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; CARVALHO, C.M. de; VEIGA, R.A.A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Revista Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VASCONCELOS, G.C. de; VERÍSSIMO, L.A.C.; SILVEIRA, A.A.; BIANCHINI, S. Energia lignocelulósica da biomassa: uma perspectiva sustentável. **Revista Brasileira Agroecologia**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 1017-1020, 2007. Apresentado no CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 2., 2007

VEREIN DER ZELLSTOFF UND PAPIER CHEMIKER UND INGENIEURE. **Merk-blatt V/105-VZIPC.**

VERGNET, L.F. **Torrefied wood**: characteristics, economics and prospects at the present stage of process development. Nogent Sur Marne: CIRAD, Head of Energy Department, 1988.

VOVELLE, C.; MELLOOTTEE, H. Modelisation de la pyrolyse oxydante ou noxydante de bois ou de déchets végétaux à partir de leurs composants. In: PALZ, W.; CHARTIER, P. (Ed.). **Energy from biomass**. 2nd ed. London: Applied Sciences, 1982. p. 925-929.

WIGBERG, H.; MAUNU, S.L. Characterization of thermally modified hard- and softwoods by ¹³C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 58, p. 461-466, 2004.

WINDEISEN, E.; STROBEL, C.; WEGENER, G. Chemical changes during the production of thermo-treated beech wood. **Wood Science & Technology**, New York, v. 41, n. 6, p. 523-536, 2007.

WOOD, T.S.; BALDWIN, S. Fuelwood and charcoal use in developing countries. **Annual Review of Energy**, Palo Alto, v. 10, p. 407-429, 1985.

YILDIZ, S.; GEZER, E.D.; YILDIZ, U.C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. **Building and Environment**, Oxford, v. 41, p. 1762-1766, 2006.

ZANZI, R.; FERRO, D.T.; TORRES, A. Biomass torrefaction. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION AND ENERGY UTILIZATION, 6., 2002, Kuala Lumpur.

ZANZI, R.; FERRO, D.T.; TORRES, A.; SOLER, P.B.; BJÖRNBOM, E. Biomass torrefaction. In: WORLD CONFERENCE AND TECHNOLOGY EXHIBITION ON BIOMASS FOR ENERGY, INDUSTRY AND CLIMATE PROTECTION, 2., 2004, Rome.

ANEXO

Tabela 1 - Análise da variância com aplicação do teste F para o rendimento do tratamento térmico de resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	4	5542,0	1385,51	1411,5	$2,2 \cdot 10^{-16}$***
Resíduo	20	19,6	0,98		
Total	24				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 2 - Análise da variância com aplicação do teste F para o rendimento do tratamento térmico de resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	4	4898,2	1224,55	3318,6	$2,2 \cdot 10^{-16}$***
Resíduo	20	7,4	0,37		
Total	24				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 3 - Análise da variância com aplicação do teste F para a densidade a granel dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	6445,0	1288,99	6,524	0,00058***
Resíduo	24	4741,9	197,58		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 4 - Análise da variância com aplicação do teste F para a densidade a granel dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	14349,7	2869,94	20,673	$5,458 \cdot 10^{-8}$ ^{***}
Resíduo	24	3331,9	138,83		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 5 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de eucalipto para abertura de malha de 16 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	10220,4	2044,07	36,947	$1,636 \cdot 10^{-10}$ ^{***}
Resíduo	24	1327,8	55,33		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 6 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de eucalipto para abertura de malha de 8 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	1213,47	242,695	13,655	$2,303 \cdot 10^{-6}$ ^{***}
Resíduo	24	426,56	17,773		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 7 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de eucalipto para abertura de malha de 4 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	1020,44	204,09	24,558	1,035*10^{-8***}
Resíduo	24	199,45	8,31		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 8 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de eucalipto para abertura de malha menor que 4 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	1578,55	315,710	46,47	1,436*10^{-11***}
Resíduo	24	163,05	6,794		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 9 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de pinus para abertura de malha de 16 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	11572,0	2314,41	38,996	9,283*10^{-11***}
Resíduo	24	1424,4	59,35		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 10 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de pinus para abertura de malha de 8 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	4487,8	897,55	25,677	6,674*10⁻⁹***
Resíduo	24	838,9	34,96		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 11 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de pinus para abertura de malha de 4 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	366,45	73,290	10,72	1,678*10⁻⁵***
Resíduo	24	164,08	6,837		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 12 - Análise da variância com aplicação do teste F para a granulometria dos resíduos de pinus para abertura de malha menor que 4 mm

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	679,03	135,807	8,0845	0,0001378***
Resíduo	24	403,16	16,798		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 13 - Análise da variância com aplicação do teste F para o tamanho médio dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	34,263	6,8526	44,935	2,059*10⁻¹¹***
Resíduo	24	3,660	0,1525		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 14 - Análise da variância com aplicação do teste F para o tamanho médio dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	13,547	2,7094	10,992	1,377*10⁻⁵***
Resíduo	24	5,916	0,2465		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 15 - Análise da variância com aplicação do teste F para o poder calorífico superior dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	11671508	2334302	750,32	2,2*10⁻¹⁶***
Resíduo	24	74666	3111		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 16 - Análise da variância com aplicação do teste F para o poder calorífico superior dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	7933138	1586628	366,56	$2,2 \cdot 10^{-16}$ ^{***}
Resíduo	24	103883	4328		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 17 - Análise da variância com aplicação do teste F para a temperatura máxima alcançada no teste de combustão dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	142091	28418,1	14,72	$1,205 \cdot 10^{-6}$ ^{***}
Resíduo	24	46334	1930,6		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 18 - Análise da variância com aplicação do teste F para a temperatura final alcançada no teste de combustão dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	1491,7	298,35	0,9786	0,4509 ^{n.s.}
Resíduo	24	7316,5	304,86		
Total	29				

^{n.s.} Não significativo.

Tabela 19 - Análise da variância com aplicação do teste F para a porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima do teste de combustão dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	2838,6	567,72	12,684	$4,29 \cdot 10^{-6}$ ^{***}
Resíduo	24	1074,2	44,76		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 20 - Análise da variância com aplicação do teste F para a porcentagem de massa consumida na temperatura final do teste de combustão dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	275,066	55,013	78,459	$4,504 \cdot 10^{-14}$ ^{***}
Resíduo	24	16,828	0,701		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 21 - Análise da variância com aplicação do teste F para o índice de combustão (ICOM) dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	0,075337	0,0150673	37,826	$1,279 \cdot 10^{-10}$ ^{***}
Resíduo	24	0,009560	0,0003983		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 22 - Análise da variância com aplicação do teste F para a temperatura máxima alcançada no teste de combustão dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	62533	12506,7	122,1	$2,95 \cdot 10^{-16}$***
Resíduo	24	2458	102,4		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 23 - Análise da variância com aplicação do teste F para a temperatura final alcançada no teste de combustão dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	117,746	23,5491	11,714	$8,256 \cdot 10^{-6}$***
Resíduo	24	48,248	2,0103		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 24 - Análise da variância com aplicação do teste F para a porcentagem de massa consumida até a temperatura máxima do teste de combustão dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	4997,6	999,53	123,3	$2,636 \cdot 10^{-16}$***
Resíduo	24	194,6	8,11		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 25 - Análise da variância com aplicação do teste F para a porcentagem de massa consumida na temperatura final do teste de combustão dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	293,588	58,718	108,14	1,187*10⁻¹⁵***
Resíduo	24	13,032	0,543		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 26 - Análise da variância com aplicação do teste F para o índice de combustão (ICOM) de resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	0,019787	0,0039573	13,805	2,098*10⁻⁶***
Resíduo	24	0,006880	0,0002867		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 27 - Análise da variância com aplicação do teste F para o teor de materiais voláteis dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	3245,8	649,16	378,44	2,2*10⁻¹⁶***
Resíduo	24	41,2	1,72		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 28 - Análise da variância com aplicação do teste F para o teor de carbono fixo dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	3257,9	651,57	438,57	$2,2 \cdot 10^{-16}$***
Resíduo	24	35,7	1,49		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 29 - Análise da variância com aplicação do teste F para o teor de cinzas dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	0,50371	0,100742	4,6308	0,004239**
Resíduo	24	0,52212	0,021755		
Total	29				

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 30 - Análise da variância com aplicação do teste F para o teor de materiais voláteis dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	2739,64	547,93	260,05	$2,2 \cdot 10^{-16}$***
Resíduo	24	50,57	2,11		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 31 - Análise da variância com aplicação do teste F para o teor de carbono fixo dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	5	2662,78	532,56	298,55	$2,2 \cdot 10^{-16}$ ^{***}
Resíduo	24	42,81	1,78		
Total	29				

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 32 - Análise da variância com aplicação do teste F para a resistência à moagem dos resíduos de eucalipto

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	3	103,55	34,52	59,59	0,0000 ^{**}
Repetição	4	4,67	1,17	2,02	0,1194 ^{n.s.}
Estado	1	200,30	200,30	345,80	0,0000 ^{**}
Tratamento*Estado	3	65,34	21,78	37,60	0,0000 ^{**}
Resíduo	28	16,22	0,58		
Total	39	390,08			
C.V.	8,99				

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

^{n.s.} Não significativo.

C.V. Coeficiente de variação (%).

Tabela 33 - Análise da variância com aplicação do teste F para a resistência à moagem dos resíduos de pinus

Causas da variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Tratamento	3	155,37	51,79	107,75	0,0000**
Repetição	4	1,02	0,26	0,53	0,7125 ^{n.s.}
Estado	1	40,99	40,99	85,27	0,0000**
Tratamento*Estado	3	2,66	0,89	1,84	0,1623 ^{n.s.}
Resíduo	28	13,46	0,48		
Total	39	213,49			
C.V.	10,38				

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

^{n.s.} Não significativo.

C.V. Coeficiente de variação (%).