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

**Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos
visando sua adequação para uso energético**

Carlos Rogério Andrade

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

**Piracicaba
2017**

Carlos Rogério Andrade
Engenheiro Florestal

**Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua
adequação para uso energético**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Andrade, Carlos Rogério

Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético / Carlos Rogério Andrade. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

85 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Torrefação 2. Madeira urbana 3. Biomassa Lenhosa 4. Energia. I. Título

DEDICATÓRIA

A Deus, pelo dom da vida, e por estar sempre ao meu lado, ajudando a seguir em frente.

Obrigado Senhor!

In memoriam

Ao meu amado Pai e melhor amigo, Sebastião Emilio de Andrade, que tão cedo partiu, mas que continuará por toda a eternidade ao meu lado e dentro do meu coração.

Te amo paizinho... saudades eternas.

A minha mãezinha, Maria Helena, por me conceder a vida, por ensinar o amor incondicional, pelo carinho, pela entrega, pelas palavras de incentivo, pelo sorriso nas horas difíceis, por sempre acreditar em mim, obrigado por tudo minha baixinha.

A minha amada esposa Camila e a minha linda filha Olivia, pelo amor, compreensão, carinho, cumplicidade, respeito e por me fazerem a pessoa mais feliz do mundo. Obrigado por estarem sempre ao meu lado, e por dividirem comigo tantos momentos de sonhos e de alegrias, e que assim seja para sempre meus amores.

Aos meus irmãos Reginaldo, Rejane, Ronaldo e Regina, pela amizade, cumplicidade, carinho, respeito e pelos incontáveis momentos de alegria que vivemos juntos. Cada um de vocês, à sua maneira, me ajudou a ser quem sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e amigo José Otávio Brito, pela oportunidade de orientação, pela sensibilidade humana e por gentilmente ter compartilhado da sua experiência profissional e de vida não só comigo, mas com todos os seus orientados. O meu profundo e sincero agradecimento professor!

Ao amigo e irmão Ananias Francisco Dias Junior, ou simplesmente Nauê, pela amizade sincera, parceria, e pelo importantíssimo auxílio nos trabalhos da tese. Wine, você fez cada momento longe de casa valer a pena, obrigado parceiro!

Aos grandes amigos do LQCE/ESALQ, Ud, Mrs Lana, Glauco, k7, Camila e Giovana, obrigado pela amizade sincera e por cada momento compartilhado. Valeu meus amigos!

Aos companheiros de república, Rodrigo, Thiago, Wand e Martelo. Pela amizade, acolhimento, e noites de pizzas que foram compartilhadas. Toda sorte do mundo para vocês meus amigos.

A Universidade Federal de Goiás pelo incentivo a qualificação e apoio financeiro.

A Universidade de São Paulo (USP) e a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) pelo ensino gratuito e de qualidade, pela recepção e suporte acadêmico.

Ao Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF) e ao Laboratório Integrado de Química Celulose e Energia (LQCE/ESALQ), pelo suporte na realização das análises e todo apoio necessário a pesquisa.

A empresa Ecoverde Ambiental, de Piracicaba – SP, por ter cedido os resíduos para o estudo.

A empresa Montana pela realização dos testes de penetração e retenção de preservativos.

Ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela realização das análises termogravimétricas dos resíduos.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	103
Referências.....	17
2 CONTAMINAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA DE ORIGEM URBANA	21
Resumo.....	21
Abstract.....	21
2.1 Introdução.....	22
2.2 Material e Métodos.....	24
2.2.1 Material e amostragem.....	24
2.2.2 Classificação quanto aos seus potenciais riscos ao meio ambiente à saúde humana	24
2.2.3 Caracterização de contaminantes mecanicamente removíveis.....	25
2.2.4 Detecção da presença de madeira tratada.....	26
2.2.5 Análises estatísticas	26
2.3 Resultados e Discussão.....	26
2.4 Conclusões.....	32
Referências.....	33
3 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA DE ORIGEM URBANA VISANDO USO ENERGÉTICO	37
Resumo.....	37
Abstract.....	37
3.1 Introdução.....	37
3.2 Material e Métodos.....	39
3.2.1 Material e Amostragem	39
3.2.2 Propriedades físicas	39
3.2.3 Composição química	40
3.2.4 Análise imediata	40
3.2.5 Poder calorífico superior	40

3.2.6 Análise termogravimétrica	40
3.2.7 Análises Estatísticas	40
3.3 Resultados e Discussão	40
3.4 Conclusão	48
Referências	49
4 ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELA TORREFAÇÃO SOBRE RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA	53
Resumo	53
Abstract	53
4.1 Introdução	53
4.2 Material e Métodos	55
4.2.1 Material	55
4.2.2 Processo térmico de torrefação	56
4.2.3 Análises realizadas	57
4.2.4 Análise dos dados	58
4.3 Resultados e Discussão	58
4.3.1 Propriedades químicas dos resíduos	58
4.3.2 Análise imediata dos resíduos	59
4.3.3 Propriedades físicas e energéticas dos resíduos	61
4.4 Conclusões	66
Referências	66
5 ESTIMATIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA DE ORIGEM URBANA	71
Resumo	71
Abstract	71
5.1 Introdução	71
5.2 Material e Métodos	73
5.2.1 Material	73
5.2.2 Processo térmico de torrefação	74
5.2.3 Análises realizadas	74
5.2.4 Análise dos dados	76
5.3 Resultados e Discussão	76

5.3.1 Correlações entre as propriedades analisadas.....	79
5.3.2 Estimativas das propriedades de resíduos <i>in natura</i>	80
5.3.3 Estimativas das propriedades de resíduos torrados	81
5.4 Conclusões.....	82
Referências.....	82
6 CONCLUSÕES GERAIS	85

RESUMO

Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético

O interesse por novas fontes renováveis de energia é, além de uma tendência, uma necessidade da sociedade atual. Neste contexto, o uso da biomassa para fins energéticos apresenta-se de forma promissora, pois reúne atributos suficientes para contribuir com a diversificação da matriz energética local/nacional. No campo das possibilidades advindas da biomassa, se apresentam os resíduos de madeira de origem urbana, que poderiam contribuir, por exemplo, para aliviar a pressão sobre as florestas. Contudo, o uso destes resíduos na forma em que se encontram pode ser dificultado devido, entre outros, à presença de contaminantes e à alta heterogeneidade destes materiais. Neste sentido, o objetivo geral deste trabalho foi levantar os principais contaminantes presentes em resíduos de madeira de origem urbana, bem como realizar a caracterização energética desta madeira. O material analisado foi coletado em uma usina de reciclagem instalada no município de Piracicaba- SP. Os métodos e as análises descritos foram baseados em normas brasileiras, internacionais e em referências da literatura. Os resultados são apresentados nos capítulos dois, três, quatro e cinco deste trabalho.

Palavras-chave: Madeira contaminada; Resíduos lenhosos; Valorização de restos de madeira

ABSTRACT

Heat wood treatment contained in municipal solid waste aiming its adjustment for energy use

Interest in new renewable sources of energy is, beyond a global trend, a necessity of modern society. In this context, the use of biomass for energy purposes is presented as promising, as it gathers enough attributes to contribute to diversification of the local / national energy matrix. In the list of possibilities arising from biomass, present wood residues of urban origin, which could contribute, for example, to ease the pressure on forests. However, the use of this waste in the form in which they were discarded by society, without any prior treatment can be difficult, especially due to the presence of contaminants and also due to the high heterogeneity of these wastes. In this sense, the aim of this study was to identify the main contaminants in wood waste from urban as well as perform energy characterization of the material. The waste analyzed were collected in a recycling plant in the city of Piracicaba, SP. The methods used and the analyzes were based on Brazilian standards, international and literature references. The results are presented in the chapters two, three, four, five of this work.

Keywords: Contaminated wood; Wood residues; Valuation of wood waste

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Local de amostragem e coleta dos resíduos.....	24
Figura 2.2 - Participação de contaminantes mecanicamente removíveis em relação a porcentagem de massa seca de madeira.....	29
Figura 2.3 - Parte das amostras que foram submetidas ao teste colorimétrico, em que: “A” = antes do teste, e “B” = após o teste.....	32
Figura 3.1 - Análise química imediata e poder calorífico superior dos diferentes resíduos.....	44
Figura 3.2 - Perda de massa em função da temperatura para os diferentes resíduos lenhosos.....	46
Figura 3.3 - Curvas de DTG para os resíduos lenhosos analisados.....	47
Figura 4.1 - Sistema de torrefação: A: Conjunto aquisitor dos dados (Computador + datalogger); B: Cilindro de Nitrogênio; C: Estufa Elétrica; D: Orifícios para injeção de N ₂ , inserção de termopares e saída de gases; E: Câmara de torrefação.....	57
Figura 4.2 - Distribuição do tamanho das partículas em diferentes peneiras (aberturas) (% de massa seca retida nas peneiras). (A) = antes e (D) = depois.....	64
Figura 4.3 - Rendimento gravimétrico da torrefação para os diferentes tratamentos. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si considerando um mesmo tratamento ($p > 0,05$).....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Número de amostras coletadas, massa seca e umidade dos resíduos.....	27
Tabela 2.2 - Teor de cinzas totais, cinzas da madeira, cinzas contaminantes e taxa de contaminação externa.....	30
Tabela 3.1 – Número de amostras, massa seca correspondente, umidade e densidade a granel.....	41
Tabela 3.2 - Teores de extrativos totais, de holocelulose e de lignina.....	42
Tabela 4.1 - Tratamentos analisados, composição e condições de avaliação.....	56
Tabela 4.2 - Resultados de extrativos totais e lignina insolúvel.....	58
Tabela 4.3 - Valores médios para análise imediata.....	60
Tabela 4.4 - Valores médios de densidade a granel (DG), poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (DE).....	62
Tabela 5.1 - Tratamentos analisados.....	74
Tabela 5.2 - Valores médios para o rendimento da torrefação.....	77
Tabela 5.3 - Valores médios para as propriedades analisadas.....	78
Tabela 5.4 - Matriz de correlação para os resíduos <i>in natura</i>	79
Tabela 5.5 - Matriz de correlação para os resíduos torrados.....	80
Tabela 5.6 - Parâmetros estatísticos das equações para os resíduos <i>in natura</i> ...	80
Tabela 5.7 - Parâmetros estatísticos das equações para os resíduos torrados.....	81

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas cinco décadas observou-se um aumento acentuado da população mundial correspondendo a mais que o dobro, e ao mesmo tempo, esse rápido crescimento foi acompanhado por um forte processo de urbanização das cidades. De acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), em 1970 a população mundial era de 3,6 bilhões de habitantes. No ano de 2015 o contingente alcançou o montante de 7,3 bilhões. A previsão é de que em 2050 a população alcance 9,3 bilhões de habitantes e destes, 68% deverão habitar em áreas urbanas (FAO, 2015).

No Brasil a situação foi semelhante, e de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), em 1970 a população brasileira era de 96 milhões de habitantes, e em 2015, registrou-se 203 milhões. As percentagens de pessoas em áreas urbanas nos respectivos anos eram de 55% e 85%. As estimativas são de que a população brasileira atinja em 2030 cerca de 223 milhões de pessoas (IBGE, 2016).

O aumento da população culminou com a elevação do consumo de energia e com a geração cada vez maior de resíduos. No Brasil, por exemplo, a taxa de crescimento no consumo de energia entre os anos de 2005 e 2014 foi de 3,5% (STCP, 2015). As projeções indicam que a demanda por este insumo deve dobrar até 2030 e que as reservas de combustíveis não renováveis, como gás natural e petróleo, se esgotarão nos próximos 100 anos (IBÁ, 2016).

Especificamente no que concerne aos resíduos sólidos urbanos (RSU), a geração mundial está estimada em cerca de 1,3 bilhão de $t \cdot ano^{-1}$, e espera-se que esse número alcance cerca de 2,2 bilhões de $t \cdot ano^{-1}$ até 2025. A taxa de geração de resíduos *per capita* também é projetado dos atuais 438 kg por habitante. ano^{-1} para 518,3 kg por habitante. ano^{-1} até 2025 (THE WORLD BANK, 2012).

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração de RSU no Brasil em 2014 foi de 78.583.405 toneladas, o equivalente a 387,63 kg por habitante. ano^{-1} . Deste montante, 58,4 % tiveram destinação adequada e seguiram para aterros, e os 41,6% restantes, ou seja, mais de 80 mil toneladas diárias, foram encaminhadas para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2014).

Quanto à reciclagem de RSU, um dos países líderes na atualidade é a Suécia, onde 99% dos materiais são reaproveitados e apenas 1% segue para aterros. Dos 4,4 milhões de

toneladas de resíduos produzidos anualmente naquele país, cerca de 2,2 milhões são convertidos em energia por meio do processo de waste-to-energy (WTE). Neste processo, os materiais descartados são recolhidos e encaminhados para centrais de incineração e queimados para produzir vapor que, posteriormente, será utilizado para o funcionamento de turbinas e geração de eletricidade, principalmente para suprimento em edifícios urbanos (KROOK; MÅRTENSSON; EKLUND, 2006; GLOBAL CITIZEN, 2016). Em 2010 existiam no mundo mais de 600 instalações de transformação de resíduos em energia, sendo que a maior parte estavam situados na Europa, Japão e EUA (MATTHEWS; THEMELIS, 2007; ISWA, 2013).

A recuperação de energia de diferentes materiais presentes nos RSU é uma realidade em muitos países e também uma forte tendência para o restante do mundo. Esse processo ganha impulso a partir dos compromissos assumidos pelos países signatários do acordo sobre o clima na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, COP21, pelo qual se comprometem a reduzir o uso de combustíveis fósseis e ampliar o uso de fontes alternativas de energia em suas matrizes energéticas. Entretanto, os problemas relacionados à gestão de RSU e de aumento na demanda por energia ainda estão longe de serem solucionados, sobretudo nos países emergentes.

No Brasil a legislação que trata dos RSU é a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e definiu como RSU os resíduos domiciliares, isto é, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana, quais sejam, os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços de limpeza urbana. São exemplos os restos de papéis, papelão, plásticos, metais, matéria orgânica e madeira.

Embora essa lei seja considerada um avanço no enfrentamento dos problemas sociais, ambientais e econômicos relacionados ao manejo de resíduos sólidos no país, esta encontra dificuldades de ser aplicada, devido entre outras, as dificuldades financeiras pelas quais encontram-se os municípios brasileiros na atualidade (ABRELPE, 2014).

As oportunidades relativas ao aproveitamento energético de RSU no Brasil ainda não foram percebidas, possivelmente em função do modelo historicamente adotado de aproveitamento de seus rios para obtenção de energia por meio de hidrelétricas, como as de Itaipu - PR, Tucuruí - PA, Xingó - AL e SE, dentre outras. Esse modelo embora seja responsável pela maior parte da energia elétrica gerada no país, resulta, de acordo com STCP (2015), em riscos no desabastecimento à medida que está fortemente dependente de questões

climáticas (período regulares de chuva) no país, levando a apagões como os que atingiram as regiões sudeste e centro-oeste no ano de 2015.

No que diz respeito aos inúmeros materiais que compõe o RSU, os componentes à base de madeira apresentam-se como importantes quando o objetivo é o aproveitamento energético, devido principalmente ao seu caráter renovável e à sua reconhecida qualidade para gerar energia.

O termo "resíduos de madeira urbana" refere-se aos paletes, madeiras de construção e demolição, e as madeiras que são comumente misturadas com outros resíduos sólidos urbanos. As características mais comuns são o teor de umidade relativamente baixo, geralmente de 7 a 20%, e a probabilidade de que algumas contenham materiais que não a madeira, como aditivos, tintas ou colas (Atkins e Donovan, 1996).

Há ainda a possibilidade de algumas destas madeiras estarem contaminadas por substâncias perigosas, tais como conservantes e metais pesados (Bouslamti et al., 2012). Podem existir ainda, de acordo com estudo do Ministério do Meio Ambiente (MMA) madeiras contaminadas por concreto, argamassa, metais ferrosos e não ferrosos (MMA, 2009a). Contaminantes como solo, gesso, amianto, papel, papelão, papeis de parede, ceras, óleos, vernizes e adesivos retardantes de fogo são também descritos na literatura (REMADE SCOTLAND, 2004).

A estimativa oficial mais recente é de que no país, somente o setor da construção civil e as áreas urbanas sejam responsáveis por 2,79 milhões de toneladas de resíduos de madeira, para os quais os destinos mais comuns são: aterro em obras civis; aterro sanitário; aterro específico (aterro de inertes); estações de reciclagem; e deposição irregular (MMA, 2009b).

Além da possibilidade de contaminação por produtos diversos, estes resíduos são também conhecidos por ser um material altamente heterogêneo, tanto em termos de espécies de madeira que os compõem, como em relação aos diferentes formatos e tamanhos em que se apresentam. Essas atribuições cooperam para a desvalorização desta biomassa e pesquisas relacionadas à padronização destas características precisam ser incentivadas, tornando-a uma matéria prima mais atraente e adequada ao consumo energético.

No que tange aos processos com a finalidade de promover a uniformização ou homogeneização destas características está o tratamento térmico da torrefação. Esta técnica consiste em um processo de pirólise leve, que ocorre dentro da faixa de temperatura 200 a 300°C, na ausência de oxigênio e com baixas taxas de aquecimento (BERGMAN; VERINGA, 2005). O material termicamente tratado apresenta algumas vantagens quando comparado com

o material original, tais como a diminuição da higroscopicidade, o aumento na resistência à degradação biológica, aumento do poder calorífico e maior densidade energética (BRITO, 1993). Dependendo da temperatura empregada poderá haver a perda de tenacidade e de parte da estrutura fibrosa da madeira, acarretando em redução no gasto com energia para, por exemplo, transformar o material em pó (BERGMAN et al., 2005; ARIAS et al., 2008; SHANG et al., 2012).

Outra hipótese é a de que o tratamento térmico possa contribuir para uma parcial descontaminação da madeira, a partir da volatilização de eventuais compostos químicos que possam estar presentes nestes resíduos, como tintas, vernizes e resinas.

Todavia, na caracterização tecnológica destes resíduos são requeridos criterioso processo de amostragem, uma extensa lista de análises laboratoriais, além de conhecimento específico sobre tais materiais, resultando em uma rotina dispendiosa tanto do ponto de vista financeiro quanto do tempo necessário para as análises.

Neste sentido, são promissores o uso de ferramentas matemáticas estatísticas para acessar de forma rápida e indireta dados relativos as propriedades da madeira, conforme resultados descritos por Almeida et al. (2014); Cavalheiro et al. (2016); Christoforo et al. (2016).

Nesta linha, Prótasio et al. (2012) descreveram que a modelagem pelo uso de regressões lineares simples ou múltiplas pode ser fundamental para analisar a relação entre variáveis e realizar previsões de interesse técnico-científicas, como poder calorífico superior, componentes químicos elementares, teor de cinzas e outros. Outra importante vantagem é a possibilidade de diminuição de custos e tempo das análises em avaliações preliminares de resíduos lignocelulósicos para a produção de calor, vapor ou eletricidade em caldeiras ou gaseificadores (PROTÁSIO et al., 2011).

Supõe-se, portanto, que além da tradicional caracterização feita em laboratório, a utilização de modelos estatísticos de regressão possa fornecer parâmetros que auxiliem na compreensão destas propriedades e na promoção do uso destes resíduos.

Não obstante, o aproveitamento destes deve ser considerado importante do ponto de vista estratégico para uma região ou local, uma vez que seu uso transcende a dimensão energética. Na realidade compõe um arranjo de políticas de cunho social (saúde, saneamento, etc.), regional (desenvolvimento local) e ambiental (mitigação de impactos dos resíduos) (MME, 2014).

Diante o exposto, e devido à escassez de dados relativos ao potencial energético da madeira que vai para o lixo dos milhares de municípios brasileiros, é que se apresenta esse trabalho, que teve como objetivo geral o tratamento térmico da madeira contida em uma amostra de RSU de uma usina de reciclagem instalada no município de Piracicaba SP, visando sua adequação para uso energético. Para tanto, esse trabalho foi dividido em quatro capítulos, a saber:

Capítulo 2. Contaminação de resíduos de madeira de origem urbana

Neste capítulo foi verificada a presença de eventuais contaminantes de resíduos de madeira de origem urbana.

Capítulo 3. Caracterização de Resíduos de madeira de origem urbana visando uso energético

O objetivo neste foi caracterizar resíduos quanto ao seu potencial energético.

Capítulo 4. Alterações provocadas pela torrefação sobre resíduos madeireiros de origem urbana

Neste capítulo, os resíduos de madeira foram submetidos ao tratamento térmico da torrefação e suas características físicas e químicas foram analisadas.

Capítulo 5. Estimativas das propriedades de resíduos de madeira de origem urbana

O objetivo neste foi estimar as propriedades energéticas de resíduos de madeira de origem urbana antes e após o tratamento térmico da torrefação.

Referências

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/panorama_envio.cfm?ano=2014>.

ALMEIDA, D. H. De; SCALIANTE, R. D. M.; CHRISTOFORO, A. L.; DONIZETI, L.; ANTONIO, F.; LAHR, R.; ALVES, A.; CALIL, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 203–207, 2014.

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**, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.

ATKINS, R. S.; DONOVAN, C. T. **Wood Products in the Waste Stream: Characterization and Combustion Emissions**. 1996.

BERGMAN, P.; BOERSMA, A.; KIEL, J.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K.; JANSSEN, F. J. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. **2nd World conference and technology exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection**, p. 78–82, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX--04-029#page=78>>.

BERGMAN, P. C. a.; VERINGA, H. J. Combined torrefaction and pelletisation. **Analysis**. n. July, p. 29, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications>>.

BOUSLAMTI, A.; IRLE, M. ; C, B.; SALVADOR, V.; BONDU, M.; HULO, S.; CARON, B. Why Simulate a Sample of Recycled Wood? **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 14, n. 2, p. 145–153, 2012.

BRITO, J. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **Piracicaba: IPEF**, 1993. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr181.pdf>>.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H. De; CHRISTOFORO, A. L.; ANTONIO, F.; LAHR, R.; CARLOS, S. **Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species**. v. 6, n. 3, p. 107–112, 2016.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H. De; ALMEIDA, D. H. De; CÉSAR, J.; PANZERA, T. H.; ANTONIO, F.; LAHR, R. **Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density**. v. 6, n. 2, p. 23–27, 2016. Disponível em: <<file:///C:/Users/OWEN/Downloads/10.5923.j.ijme.20160602.01.pdf>>.

FAO. **Global population dynamics**. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/O/*/E>. Acesso em: 14 set. 2016.

GLOBAL CITIZEN. **Here's How Sweden is Recycling 99% of its Waste**. Disponível em: <<https://www.globalcitizen.org/en/content/sweden-garbage-waste-recycling-energy/>>. Acesso em: 14 set. 2016.

IBA. **Relatório IBÁ 2016 Indústria brasileira de árvores**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf>.

IBGE. **IBGE | Projeção da população**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 13 set. 2016.

ISWA. **Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.iswa.org/media/publications/knowledge-base/?tx_iswaknowledgebase_searchbox\[searchphrase\]=Waste-to-Energy State-of-the-Art-Report&cHash=59be73bb675c10376dddb55d1d90051c](http://www.iswa.org/media/publications/knowledge-base/?tx_iswaknowledgebase_searchbox[searchphrase]=Waste-to-Energy+State-of-the-Art-Report&cHash=59be73bb675c10376dddb55d1d90051c)>.

KROOK, J.; MÅRTENSSON, A.; EKLUND, M. Sources of heavy metal contamination in Swedish wood waste used for combustion. **Waste Management**, v. 26, n. 2, p. 158–166, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.017>>.

MATTHEWS, E.; THEMELIS, N. J. **Potential for Reducing Global Methane Emissions From Landfills , 2000-2030**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.necec.org/files/Matthews_Themelis_Sardinia2007.pdf>.

MMA. **Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para Fins Energéticos.** Curitiba, 2009a.

MMA. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado.** Curitiba, 2009b.

MME. **Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Nota Técnica DEA 18/14.** [s.l: s.n.].

PROTÁSIO, T. D. P.; BUFALINO, L.; HENRIQUE, G.; TONOLI, D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira.** p. 113–122, 2011.

PRÓTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, M. G.; TONOLI, G. H. D.; TRUGILHO, P. F. Modelagem Do Poder Calorífico Superior Em Função Dos Componentes Elementares E Minerais. **XIII Ebramem**, n. June 2016, 2012. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/235469567_MODELAGEM_DO_PODER_CALORIFICO_SUPERIOR_EM_FUNCO_DOS_COMPONENTES_ELEMENTARES_E_MINERAIS_MODELING_OF_THE_HIGHER_HEATING_VALUE_IN_FUNCTION_OF_ELEMENTAL_AND_MINERAL_COMPONENTS>.

REMADE SCOTLAND. **Woodwaste Arisings in Scotland: Assessment of Available Data on Scottish Woodwaste Arisings.** [s.l: s.n.].

SHANG, L.; FEI, Q.; ZHANG, Y. H.; WANG, X. Z.; FAN, D. Di; CHANG, H. N. Thermal Properties and Biodegradability Studies of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 20, n. 1, p. 23–28, 2012.

STCP. **Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil.** Julho, p. 59, 2015. Disponível em: <<http://www.inputbrasil.org/publicacoes/oportunidades-para-florestas-energeticas-na-geracao-de-energia-no-brasil/>>.

THE WORLD BANK. **WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>>.

2 CONTAMINAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA DE ORIGEM URBANA

Resumo

O crescente interesse no uso de resíduos para energia requer atenção aos possíveis contaminantes que podem a estes estar associados. Com os resíduos de madeira de origem urbana não é diferente e, frequentemente, podem estar vinculados a diversos tipos de agentes contaminantes, como restos de cimento, argamassa, pregos, metais pesados, dentre outros. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi fazer um levantamento dos principais contaminantes presentes em uma amostra de resíduos de madeira obtidas em uma usina de reciclagem instalada no município de Piracicaba – SP. Os resíduos foram analisados através de ensaios previstos em normas brasileiras e da literatura. Os resultados quanto a riscos à saúde e ao ambiente classificaram os cavacos como Classe II B – Inertes. A contaminação com pregos, parafusos, plásticos e dobradiças foi menor do que 1% em relação à massa seca da madeira ao qual estavam aderidos. A taxa de contaminação por minerais variou entre 10,7% para resíduos de MDF e 25% para resíduos de aglomerado. Para o lote de resíduos analisados não foi detectada a presença de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) ou borato de cobre cromatado (CCB). Estabeleceu-se, assim, indicativos quantitativos daquilo que tem sido observado na prática, no que diz respeito à contaminação de resíduos madeireiros, quando estes são provenientes do meio urbano.

Palavras-chave: Contaminantes de madeira; Rejeitos urbanos de madeira; Madeira tratada

Abstract

The growing interest in the use of waste for energy draws attention to their potential of pollution. This statement is also true for urban wood waste that often is linked to various types of contaminants as cement, debris, mortar, nails and heavy metals amongst others. This work it is a case study that aimed to survey the main contaminants of urban wood waste. The wood waste were analyzed according to Brazilian standards and assay from literature. The woodchips were rated as Class II B – inert, according to the health and environmental recommendations of the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The contamination with nails, screws, hinges and plastics was less than 1% of the dry mass of the waste. The contamination rate per mineral ranges from 10.7% for Medium-density fiberboard (MDF) waste, to 25% for particleboard. Among the batch of analyzed wastes there was no trace of wood treated with Chromated copper arsenate (CCA) or Chromated copper borate (CCB). Hence, it was obtained some new quantitative indicators, for contamination of wood wastes coming from urban area, assisting in the choice of use or in the final destination.

Keywords: Wood contaminant; Urban wood waste; Treated timber

2.1 Introdução

O uso de resíduos de biomassa no Brasil se mostra uma alternativa para geração de receitas e mitigação de impactos ambientais, tanto pelo setor industrial, como mais recentemente, pelo setor público através, principalmente, dos municípios.

A partir da Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, estabeleceu-se um novo campo de oportunidades relacionadas ao aproveitamento energético daqueles materiais que, até então, eram descartados em aterros sanitários e terrenos abandonados.

Dentre os inúmeros materiais que são descartados como papeis, plásticos, metais, vidros, chama a atenção os resíduos de madeira gerados no ambiente urbano, seja por empreendimentos, repartições públicas ou pela população em geral. Este material lenhoso se distingue dos demais devido principalmente ao seu caráter renovável e ao seu potencial para uso energético.

Atkins e Donovan (1996), referem-se ao termo "resíduos de madeira urbana" como sendo os paletes, as madeiras de construção e demolição, e as madeiras que são comumente misturadas com outros resíduos sólidos urbanos. Segundo os autores, as características mais comuns são o teor de umidade relativamente baixo, geralmente de 7 a 20%, e a probabilidade de que algumas contenham materiais que não a madeira, como aditivos, tintas ou adesivos/colas. Bouslamti et al. (2012), também relatam sobre a possibilidade de algumas destas madeiras estarem contaminadas por substâncias perigosas, tais como conservantes e metais pesados.

Além destes, são relatadas contaminação por concreto, argamassa, metais ferrosos e não ferrosos (MMA, 2009), solo, gesso, amianto, papel, papelão, papeis de parede, ceras, óleos, tintas, vernizes, colas e adesivos retardantes de fogo (REMADE SCOTLAND, 2004).

A avaliação do grau de contaminação à que estes resíduos estão sujeitos torna-se importante quando se objetiva o seu uso para energia, sendo que, a crescente demanda por fontes renováveis de energia também corrobora para estudos de caracterização desta biomassa (KROOK e MÅRTENSSON e EKLUND, 2006).

Os restos de cimento e argamassa que ficam aderidos à madeira, como àqueles provenientes do setor da construção civil, são caracterizados por apresentarem alto teor de minerais em sua composição, o que contribui para o desgaste das ferramentas de corte (SOUZA et al., 2009), para redução do poder calorífico (BRAND, 2010), para aumento das

cinzas resultantes da combustão (BRAND, 2010; KROOK e MÅRTENSSON e EKLUND, 2004), e com problemas de corrosão em equipamentos metálicos (BRAND, 2010). Os pregos, parafusos e dobradiças também podem levar a um desgaste de ferramentas e maquinários e devem também ser identificados e removidos.

Além destes, há a possibilidade de contaminação por metais pesados, por exemplo (NZIHOU e STANMORE, 2013). A origem destes metais pode estar atrelada ao uso de soluções químicas para acabamento superficial e conservantes industriais aplicados na madeira, como arsênio, cromo, cobre, zinco, mercúrio e chumbo, e que foram bastante utilizados durante todo o século 20 (NILSSON e JERMER, 1999). Atkins e Donovan (1996), também relatam a presença de alumínio, titânio e manganês nestas madeiras.

Dentre os principais conservantes industriais utilizados atualmente, Vidal et al. (2015) citam o CCA, o CCB e o creosoto em menor escala. Destes, o CCA é mais utilizado no mundo, principalmente para uso em postes, cercas, equipamentos de praças infantis, decks, passarelas e construções residenciais (APPEL et al., 2006).

Os resíduos de madeira tratada são considerados por muitos especialistas como importante fonte poluidora. O CCA por exemplo tem potencial de impacto negativo ao ambiente e também à saúde das pessoas, variando conforme concentração (Hasan e Solo-Gabriele e Townsend, 2011).

Townsend, T. G. et al. (2003) e Townsend, T. et al. (2005), alegam que madeira com soluções preservantes pode ser frequentemente encontrada em instalações de reciclagem e, se não for removida, pode servir como uma importante fonte de contaminação. Ainda neste sentido, Jacobi et al. (2007) alertam sobre as dificuldades de identificar madeiras que receberam tratamento preservativo no fluxo de resíduos, reforçando a importância da sua identificação para métodos eficazes de triagem.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi identificar os principais tipos de contaminantes que podem estar associados aos resíduos de madeira de origem urbana tendo como referência o município de Piracicaba - SP.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Material e amostragem

O local de coleta foi em uma empresa do ramo de reciclagem de entulhos da construção civil que está instalada no município de Piracicaba – SP, Brasil. Esta empresa é habilitada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB a receber entulhos deste setor, porém, além destes, recebe entulhos provenientes do serviço de aluguel de caçambas da própria empresa.

A amostragem foi conduzida de acordo com as descrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (2004) NBR 10007 (ABNT, 2004). Foram coletadas 240 amostras de resíduos de madeira maciça e 240 amostras de resíduos de painéis. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos de 100 litros e encaminhadas para o laboratório de Química Celulose e Energia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, para análises posteriores. A Figura 2.1 apresenta a pilha de resíduos em que foi realizada a amostragem do material.

Os valores de umidade foram medidos nos resíduos em suas formas originais, tal como coletado no campo. A norma utilizada foi a NBR 14929 (ABNT, 2003).

Figura 2.1 - Local de amostragem e coleta dos resíduos

2.2.2 Classificação quanto aos seus potenciais riscos ao meio ambiente à saúde humana

A classificação foi realizada segundo os métodos descritos na norma Brasileira NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os procedimentos para análise do extrato lixiviado seguiram a norma NBR 10.005 (ABNT, 2004) para definições se classe I – perigosos, e classe II – não

perigosos. O teste de solubilidade foi segundo os procedimentos da norma NBR 10.006 (ABNT, 2004), que visa a classificação em classe II A – não inertes, e classe II B – inertes.

Para esta análise foi utilizada uma amostra composta de resíduos de madeira maciça (5 kg) e de painéis reconstituídos (5 kg).

2.2.3 Caracterização de contaminantes mecanicamente removíveis

Objetos metálicos e não metálicos

Visou identificar e quantificar a presença de contaminantes externamente aderidos à madeira, como pregos, parafusos, dobradiças e plásticos. A análise foi realizada em todas as 480 amostras e, quando encontrado algum contaminante, o mesmo era retirado da madeira, e sua massa era obtida por meio de uma balança analítica com precisão 0,001g. Os resultados foram expressos em termos de porcentagem de contaminantes em relação à massa seca das amostras de madeira.

Contaminantes minerais

A determinação do teor de contaminantes minerais aderidos foi feita mediante determinação dos teores de cinzas das amostras. Para tanto, o teor de cinzas total (minerais de composição e minerais contaminante) foi obtido segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

No procedimento para determinar o teor de minerais de composição foram utilizadas dez gramas de serragem que passaram pela peneira de 20 *mesh* e que ficaram retidas na peneira de 40 *mesh*. Estas amostras foram colocadas em um béquer de 250 ml, o qual continha previamente 200 ml de água destilada. A solução foi agitada por um minuto e deixada em repouso por dois minutos. Na sequência a serragem que se encontrava sobrenadante à solução foi recolhida e colocada para secar até massa constante. Nessa serragem, absolutamente seca, foi então analisado o teor de cinzas segundo procedimento descrito na norma NBR 8112 (ABNT, 1986). Considera-se que o teor de cinzas obtido nesta análise seja isento de contaminantes, ou seja, que os minerais que foram adquiridos decantem no béquer durante o ensaio. Foram realizadas três repetições por amostra.

A taxa de contaminação foi calculada, tomando-se por base a equação eq. (1). descrita por Brito e Ceribelli (2012).

$$Txcont = \frac{TCzt - TCzm}{TCzt} \times 100 \quad (1)$$

Em que: Txcont = Taxa de contaminação (%). TCzt = Teor de cinzas total (cinzas da madeira + cinzas adquiridas/contaminante) (%). TCzm = Teor de cinzas da madeira livre de minerais contaminantes (%).

2.2.4 Detecção da presença de madeira tratada

O ensaio para detectar a presença de madeira tratada foi realizado somente para a categoria de madeira maciça, visto que a indústria não utiliza madeira tratada como matéria-prima na fabricação de painéis. Para tanto, as amostras dessa categoria foram submetidas ao teste colorimétrico com o reagente químico Cromazurol S®, que permitiu atestar quais amostras eram consideradas suspeitas para a presença de CCA ou CCB. O princípio químico deste reagente na madeira é que as duas carboxilas da molécula atuam como um agente quelante, formando complexos com o cobre, seja do CCA ou do CCB, conferindo ao final do ensaio uma coloração verde azulada à madeira.

As amostras que testaram positivo foram posteriormente submetidas ao ensaio de penetração e retenção, conforme preconiza a norma NBR 6232 (ABNT, 2013).

2.2.5 Análises estatísticas

Os dados foram analisados mediante a análise de variância (ANOVA) utilizando-se de um delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento (resíduos), e quando necessário, foi aplicado o teste de Tukey para comparações múltiplas das médias. As análises foram realizadas com auxílio do software Minitab16.1® e do suplemento Action da Microsoft Excel todas a 95% de probabilidade.

2.3 Resultados e Discussão

Os resultados relativos aos resíduos amostrados, percentuais de participação em massa seca, e respectivos valores de umidade, estão relacionados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Número de amostras coletadas, massa seca e umidade dos resíduos

Resíduos	n	MS (g) [%]	U Min. (%)	U Máx. (%)	U Médio (%)
Maciça	240	68.846,7 [56]	1,96	37,39	12,26 (34,07)
Compensado	92	28.541,6 [23]	4,64	32,50	12,73 (34,32)
Aglomerado	23	5.324,3 [4]	8,73	31,45	13,93 (31,16)
MDF	76	12.487,8 [10]	9,13	37,51	15,00 (28,86)
OSB	20	3.989,3 [3]	6,08	24,03	11,01 (40,01)
Chapa dura	29	4.524,9 [4]	6,27	12,83	10,24 (42,85)
Total	480	123714,6 [100]	-	-	12,7 (33,87)

Em que: n: número de amostras. MS: massa seca. U Min: umidade base úmida mínimo. U Máx: umidade base úmida máximo. Valores entre () para a U. Médio são os coeficientes de variação dos resíduos analisados.

Analisando os dados da Tabela 2.1, nota-se que dos resíduos amostrados, 56% correspondem a madeira maciça e 44% painéis. Dentro da categoria de painéis, a maior participação em termos de massa seca foi para resíduos de compensado, representando 23% de toda a madeira coletada. Esta expressiva participação frente aos demais painéis pode, possivelmente, ser atribuída ao fato desses materiais serem altamente empregados no setor da construção civil que, por sua vez, responde por boa parte dos resíduos que chegam diariamente à usina de reciclagem onde foi realizada a coleta.

A umidade média considerando as 480 amostras foi de 12,7%. Este valor se encontra dentro da faixa de umidade relatada para resíduos de madeira de origem urbana, que situa-se entre 7 e 20% (ATKINS e DONOVAN, 1996). Os valores corroboram ainda com os resultados encontrados por Farage et al. (2013), para resíduos de madeira do polo moveleiro de Ubá MG, que obteve umidade de 17,8% para maciça, 10,3% para aglomerado e 9,8% para MDF. Pincelli (2011), encontrou para resíduos florestais da colheita de eucalipto valores de umidade da ordem de 10,4%. Lopes (2012), encontrou umidade média de 15,1% para mistura de resíduos de pinus e eucalipto, e de 15% para mistura de resíduos de painéis, moveis velhos e madeira de construção civil.

Nota-se ainda que os valores de umidade médios encontrados neste trabalho estão próximos à umidade de equilíbrio média do município de coleta, que é de 12,9% (JANKOWSKY e GALINA, 2013). Tal valor é relativamente baixo, o que é desejável segundo Brand (2010), pois quanto menor a umidade maior será a eficiência energética destes

resíduos, devido ao fato de haver menor gasto energético no procedimento de secagem deste material.

Fato interessante é que Remade Scotland (2004), relatam que a umidade também pode ser considerada um contaminante por alguns usuários finais, como na produção de combustíveis de madeira, onde o processamento adicional pode ser necessário para remover o excesso de umidade.

Classificação quanto aos potenciais riscos ao ambiente e à saúde humana

Os resultados relacionados aos parâmetros físicos, de componentes lixiviados e de extrato solubilizado estão descritos a seguir.

Características físicas da amostra: umidade 3,42%, pH (Solution1: 1) 5,77; Cianeto e sulfeto de $<1,0 \text{ mg.kg}^{-1}$; Fenol $<3,0 \text{ mg.kg}^{-1}$; Ponto de inflamação $> 60^\circ\text{C}$.

Na análise de componentes químicos lixiviados foram detectadas as presenças dos elementos bário e flúor, com resultados de $0,010 \text{ mg.L}^{-1}$ e $1,80 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente, ambos abaixo do máximo permitido pela norma que é de 70 mg.L^{-1} e 150 mg.L^{-1} , respectivamente. Os resultados para o arsênio, cádmio, chumbo, cromo total, mercúrio, prata e selênio estavam abaixo dos valores limite de detecção definidos pela norma.

Foram também analisadas a presença de pesticidas como: Aldrin + Dieldrin; clordano, DDT; 2,4-D; Endrina; Heptacloro e epóxi; lindano; Metoxicloro; pentaclorofenol; toxaphene; 2,4,5-T; 2,4,5-TP; e de outros compostos orgânicos como: benzeno; benzo (a) pireno; cloreto de vinilo; clorobenzeno; clorofórmio; total cresol; o-cresol, m-cresol, p-cresol, 1,4-diclorobenzeno; 1,2-dicloroetano; 1, 1-Dicloroetileno; 2,4-dinitrotolueno; hexaclorobenzeno; metil-etil-cetona;; hexaclorobutadieno; hexacloroetano nitrobenzeno; piridina; tetracloroeto de carbono; tetracloroetileno; tricloroetileno; 2,4,5-triclorofenol, 2,4,6-triclorofenol. No entanto, os resultados para todos os compostos foram inferiores aos valores limite de detecção estabelecidos pela norma.

Na análise do extrato solubilizado foram detectadas as presenças de alumínio ($0,03 \text{ mg L}^{-1}$), Cloretos ($11,3 \text{ mg L}^{-1}$), Ferro ($0,040 \text{ mg L}^{-1}$), Flúor ($0,13 \text{ mg.L}^{-1}$), manganês ($0,026 \text{ mg L}^{-1}$), sódio ($6,8 \text{ mg L}^{-1}$), sulfatos ($11,2 \text{ mg L}^{-1}$) e zinco ($0,20 \text{ mg L}^{-1}$), sendo que todos estes parâmetros estiveram abaixo do máximo permitido pela norma.

Estavam abaixo do limite de detecção os elementos: arsênico, bário, cádmio, chumbo, cianetos, cobre, cromo total, mercúrio, nitrato (como N), prata, selênio, fenóis totais, e os

pesticidas: Aldrin + Dieldrin, Clorodano, 2,4-D, o DDT, Endrina, lindano, Metoxicloro, Toxafeno, Heptacloro e o seu epóxido, Hexaclorobenzeno, 2,4,5-T, 2,4,5-TP.

A partir da análise feita no extrato de lixiviados e extrato solubilizado, nenhum dos parâmetros ultrapassou os limites estipulados pela norma NBR 10004. Assim, de acordo com a norma os resíduos de madeira foram classificados como sendo de classe II B - inerte, o que permite concluir que não foram encontrados elementos em quantidade suficiente para causar riscos para a saúde e ao ambiente.

Objetos metálicos e não metálicos

Os resultados relativos aos diferentes tipos de contaminantes sólidos aderidos aos resíduos de madeira são apresentados na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Participação de contaminantes mecanicamente removíveis em relação a porcentagem de massa seca de madeira

Observa-se na Figura 2.2, que os resíduos de madeira maciça, de compensado e de OSB, foram os que apresentaram maiores porcentagens de prego em suas amostras, com 0,86%, 0,63% e 0,21%, respectivamente. Os pregos são conhecidos pela sua versatilidade de uso, sendo empregados na fixação de tábuas, andaimes, escoramentos e fabricação de

caixotes, dentre outros, e talvez por isso, tenha sido o contaminante mais presente na amostra analisada.

Embora a porcentagem de pregos seja relativamente baixa, ela pode se tornar um inconveniente para quem trabalha com estes materiais. Isto porque a descontaminação da madeira a partir destes objetos requer dispêndio de energia, seja por ação mecânica ou magnética e consequentemente envolve custos.

Os parafusos representaram 0,68% da massa dos resíduos de MDF, ou seja, em 12 kg de resíduos foram encontrados 84,9 g de parafusos. A maior presença de parafusos em resíduos de MDF pode ser associada à restos de móveis velhos que são descartados por inutilidade.

O terceiro contaminante mais expressivo foram as dobradiças, sendo encontradas somente em resíduos de chapa dura, na porcentagem de 0,27% em relação a massa seca do material. Os contaminantes plásticos e grampos também foram observados, porém, com uma participação bastante pequena.

Contaminantes minerais

Os valores médios encontrados para teores de cinzas totais, de cinzas da madeira, de cinzas de contaminantes e a taxa de contaminação externa estão apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Teor de cinzas totais, cinzas da madeira, cinzas contaminantes e taxa de contaminação externa

Resíduo	Valores médios (%)											
	TCzt			TCzm			TCzcont			Txcont		
Maciça	0,89	c	(0,05)	0,77	c	(0,05)	0,12	b	(0,01)	14,3	ab	(1,25)
Compensado	2,09	a	(0,23)	1,61	a	(0,15)	0,49	a	(0,08)	22,96	ab	(1,26)
Aglomerado	0,96	c	(0,06)	0,72	c	(0,04)	0,24	ab	(0,03)	25,1	a	(1,73)
MDF	1,77	ab	(0,19)	1,58	a	(0,13)	0,19	b	(0,07)	10,12	b	(3,10)
OSB	1,20	bc	(0,05)	1,06	bc	(0,04)	0,14	b	(0,02)	11,84	ab	(1,27)
Chapa dura	1,76	ab	(0,03)	1,49	ab	(0,12)	0,26	ab	(0,10)	15,46	ab	(5,56)

TCzt: Teor de cinzas total. TCzm: Teor de cinzas da madeira sem contaminante. TCzcont: teor de cinzas contaminantes. Txcont: Taxa de contaminação externa. Valores entre parênteses () correspondem ao Erro padrão da análise.

Observando a Tabela 2.2, nota-se que a maior contaminação por minerais (Txcont) está associada a resíduos de compensado e aglomerado com 22,9 e 25% respectivamente. Isto significa que quase um quarto de todos os minerais presentes nestes resíduos são provenientes de fontes externas. Uma possível razão para esses valores expressivos pode estar na possibilidade de contaminação por cimentos, argamassas e terras, comuns quando do uso destes materiais em serviço, por exemplo na construção civil.

Na literatura os valores pesquisados para teores de cinzas estão na sua maioria abaixo de 2%, como os descritos por Brand (2010), que estudou diversos tipos de resíduos de madeira e encontrou os seguintes teores de cinzas: cavaco verde de pinus de serraria e laminadora 1,87%, serragem de passivo ambiental (Pinus e Araucária) 0,81%, serragem de pinus de serraria 1,13%. Pincelli (2011), analisou resíduos da colheita florestal de pinus e eucalipto e encontrou teores de cinzas de 0,53% e 0,98%, respectivamente. Lopes (2012), encontrou para uma mistura de resíduos de pinus e eucalipto teor de cinzas de 1,1%, e para mistura de resíduos de painéis, moveis velhos e madeira de construção civil teor de cinzas de 1,44%. Zau et al. (2014), estudaram resíduos de madeira da Amazônia e encontraram teor de cinzas médio de 1,72%.

Embora os teores de cinzas total (TCzt) encontrados neste trabalho também estejam situados abaixo de 2%, há que se considerar os valores significativos de taxa de contaminação que foram relatados anteriormente (Txcont), e suas implicações frente ao uso energético destes resíduos.

Segundo Brand (2010), o teor de cinza, natural ou de contaminação, determinado na análise imediata, tem um significado importante por duas razões: a cinza não se queima, e permanece no local do processo, o que exige um sistema próprio para sua retirada; pode ser material abrasivo, causando problemas de corrosão em equipamentos metálicos. Isso faz com que seja considerado um planejamento prévio dos sistemas de recolhimento.

Deteção de madeira tratada

Das 240 amostras que foram testadas pelo reagente colorimétrico, 25 apresentaram alteração na sua cor, mudando de uma cor natural da madeira para uma coloração próximo ao azul/violeta. A Figura 2.3 ilustra parte das amostras antes e após o teste colorimétrico.

Figura 2.3 - Parte das amostras que foram submetidas ao teste colorimétrico, em que: “A” = antes do teste, e “B” = após o teste

As amostras consideradas suspeitas pelo teste de cor foram submetidas ao ensaio de penetração e retenção, no qual não foram detectados a presença de madeira tratada no referido lote, sendo, portanto, descartada a presença de CCA ou CCB nestas amostras.

O fato das amostras terem apresentado alteração na cor pelo teste colorimétrico, não significa, necessariamente, presença de soluções preservantes, sendo uma hipótese provável, a de ter ocorrido uma reação dos componentes extratáveis da madeira com a molécula de Cromazurol.

Outra hipótese é de que possa ter havido influência da presença de hidróxido de ferro e cloreto de zinco que são produtos de corrosão e, que devem ser facilmente encontrados nos resíduos de madeira amostrados.

2.4 Conclusões

A análise do extrato de lixiviados e extrato solubilizado dos cavacos permitiu classificá-los como sendo Classe II B – Inertes, não apresentando desta forma riscos ao ambiente e à saúde humana. A contaminação por pregos, parafusos, plásticos e dobradiças ocorreu de forma bastante discreta, quando comparadas à massa seca dos resíduos analisados.

A taxa de contaminação por minerais foi observada para todos os resíduos analisados, sendo maiores para os resíduos de aglomerado e de compensado.

Para o presente estudo não foram detectadas a presença de madeira tratada com CCA ou CCB.

Referências

- APPEL, J. S. D. L. et al. Aspectos toxicológicos do preservativo de madeira CCA (arseniato de cobre cromatado): Revisão. **Revista Brasileira de Toxicologia**, v. 19, n. 1, p. 33–47, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6232:2013**: Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão. Rio de Janeiro, ABNT, 6232. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112:1986**: Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, ABNT, 8112. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro; 2004. 71p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 10.005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro; 2004. 20p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro; 2004. 7p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007:2004**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 25p.
- ATKINS, R. S.; DONOVAN, C. T. **Wood Products in the Waste Stream: Characterization and Combustion Emissions**. . Washington: [s.n.], 1996.
- BOUSLAMTI, A. et al. Why Simulate a Sample of Recycled Wood? **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 14, n. 2, p. 145–153, 2012.
- BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Editora In ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2010.
- BRITO, J. O.; CERIBELLI, U. L. **Determinação de contaminantes sólidos não combustíveis em biomassa: Procedimento de Avaliação**, 2. Piracicaba: USP/ESALQ. , 2012
- FARAGE, R. M. P. et al. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá - MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203–212, 2013.
- HASAN, A. R.; SOLO-GABRIELE, H.; TOWNSEND, T. Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology: Part II. Sorting efficiencies. **Waste Management**, v. 31, n. 4, p. 695–704, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.010>>.
- JACOBI, G. et al. Evaluation of methods for sorting CCA-treated wood. **Waste Management**, v. 27, n. 11, p. 1617–1625, 2007.
- JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de madeiras**. . [S.l: s.n.], 2013

KROOK, J.; MÅRTENSSON, A.; EKLUND, M. **Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 1, p. 1–14, 2004.

KROOK, J.; MÅRTENSSON, A.; EKLUND, M. Sources of heavy metal contamination in Swedish wood waste used for combustion. **Waste Management**, v. 26, n. 2, p. 158–166, 2006.

LOPES, G. DE A. **Uso energético de resíduos madeireiros em um pólo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo**. 2012. 101 p. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para Fins Energéticos. **MMA, 2009**. Curitiba: [s.n.], 2009

NILSSON, K.; JERMER, J. Inventory of the use of preservative-treated wood and wood preservatives in Sweden 1900–1997. In: **Proceedings of the Annual Meeting of the International Research Group on Wood Preservation IRG/WP 99-50137**. Rosenheim, Germany: [s.n.], 1999.

NZIHOU, A.; STANMORE, B. The fate of heavy metals during combustion and gasification of contaminated biomass-A brief review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 256-257, p. 56–66, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.02.050>>.

PINCELLI, A. L. P. S. M. **Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética**. 2011. 127 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.

REMADE SCOTLAND. **Woodwaste Arisings in Scotland: Assessment of Available Data on Scottish Woodwaste Arisings**. . Glasgow - Scotland: [s.n.], 2004.

SOUZA, S. S. DE et al. **Deteção do teor de cinzas e sílica em materiais lignocelulósicos**. Disponível em: <<http://www.sbpnet.org.br/livro/61ra/resumos/resumos/5044.htm>>. Acesso em: 14 maio 2015.

TOWNSEND, T. et al. Preservative leaching from weathered CCA-treated wood. **Journal of environmental management**, v. 75, n. 2, p. 105–13, abr. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479705000113>>. Acesso em: 14 maio 2015.

TOWNSEND, T. G. et al. Impact of chromated copper arsenate (CCA) in wood mulch. **The Science of the total environment**, v. 309, n. 1-3, p. 173–85, 20 jun. 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969703000470>>. Acesso em: 14 maio 2015.

VIDAL, J. M. et al. Preservação de madeiras no brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 257–271, 2015.

ZAU, M. D. L. et al. Avaliação das Propriedades Química , Física e Mecânica de Painéis Aglomerados Produzidos com Resíduo de Madeira da Amazônia - Cumaru (Dipteryx Odorata) e Resina Poliuretana à Base de Óleo de Mamona. **Polímeros**, v. 24, p. 726–732, 2014.

3 CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA DE ORIGEM URBANA VISANDO USO ENERGÉTICO

Resumo

A crescente demanda por energia impulsiona novas frentes de pesquisas por fontes que sejam economicamente viáveis e sustentáveis do ponto de socioambiental. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi caracterizar um lote de resíduos de madeira de origem urbana visando uso energético. Foram avaliados seis diferentes tipos de resíduos: madeira maciça, compensado, aglomerado, MDF, OSB, e chapa dura. Os resíduos foram coletados em uma usina de reciclagem no município de Piracicaba – SP e levados ao laboratório para realização das análises físicas, químicas e termogravimétricas. O experimento foi conduzido sob um delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento (resíduos). Para análise dos dados foi realizada a análise de variância e aplicado o teste de Tukey para comparações múltiplas das médias. De maneira geral, não foram observadas grandes diferenças entre os resultados dos resíduos de madeira maciça e os resíduos de painéis de madeira. Os resíduos apresentaram características que os qualificam para uso energético.

Palavras-chave: energia da biomassa lenhosa, painéis, cavacos para combustível.

Abstract

The increasing demand for energy propels new areas of research in the search for sources that are economically viable and sustainable from the socio-environmental point of view. In this sense, the objective of this study was to characterize a batch from urban wood waste aimed at energy use. We evaluate six different types of waste: solid wood, plywood, chipboard, MDF, OSB, and plate. The residues were collected in a recycling plant in Piracicaba - SP and were taken to the laboratory to carry out the physical, chemical and thermogravimetric analyses. The experiment was conducted in a completely randomized design with three replicates per treatment (waste). Data analysis was performed by analysis of variance and the Tukey test applied for multiple comparisons of means. Overall, there were no major differences between the results of solid wood residues and waste panels. The residues presented characteristics that qualify them for energy use.

Keywords: Energy woody biomass; Panels; Wood chips for fuel

3.1 Introdução

O uso de resíduos de biomassa no Brasil tem se mostrado uma alternativa promissora para geração de receitas e mitigação de impactos, tanto pelo setor industrial quanto pelo setor público, principalmente após a aprovação da Lei 12.305 de 2010 que instituiu Política Nacional de Resíduos Sólidos no país.

No que tange ao reaproveitamento dos resíduos de madeira, Macfarlane (2009) chama a atenção para aqueles de origem urbana, pois podem oferecer de forma confiável uma significativa quantidade de madeira com potencial para uso como fontes de combustível e geração de calor/energia, para redução no uso de combustíveis fósseis, além da diminuição da pressão sobre as florestas.

No Brasil, segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) a geração dos resíduos tem origem, sobretudo, nas atividades industriais madeireiras e também nas áreas urbanas, que por sua vez, são decorrentes dos setores da construção civil, de arborização e de embalagens defeituosas (MMA, 2009a). Lyon; Bond, (2014) ainda incluem nesta categoria as sobras de madeira a partir de reformas em residências, de descarte de móveis velhos, caixotes de madeira e pallets defeituosos.

As estimativas mais atuais são de que no país, somente o setor da construção civil e as áreas urbanas sejam responsáveis por 2,79 milhões de toneladas de resíduos de madeira, para os quais os destinos mais comuns são: aterro em obras civis; aterro sanitário; aterro de inertes; estações de reciclagem; e deposição irregular (MMA, 2009b).

Para ser utilizada com objetivos energéticos, a madeira não deve apresentar valores de umidade acima de 20%, pois valores superiores reduzem a capacidade de calor de combustão, da temperatura da câmara de queima e da temperatura dos gases de escape (FARINHAQUE, 1981). Segundo Brito (1986), a presença de água representa poder calorífico negativo, devido ao fato de que parte da energia liberada é gasta na vaporização da mesma e que variações muito significativas no teor de umidade podem dificultar o processo de combustão, o que levaria a constantes ajustes no sistema. Brand; Muñiz (2012) verificaram que a composição química, o poder calorífico e a umidade da biomassa florestal sofrem variações em relação ao tempo de estocagem. Esta situação, de certa forma, se assemelha às condições observadas para pilhas de disposição final de resíduos de madeira de origem urbana, justificando a sua caracterização.

Quanto ao potencial energético de painéis de madeira oriundos de móveis velhos que são descartados no lixo, Farage et al. (2013) constataram que a viabilidade técnica e econômica para o seu reaproveitamento tem relação direta com a umidade e poder calorífico e cinzas.

Além das características mencionadas, é de grande importância a avaliação termogravimétrica do material (TGA). Por meio da TGA, é possível de forma confiável e simples, ter acesso às características de combustão e decomposição dos combustíveis,

fornecendo uma previsão da eficiência de combustão, por exemplo, para projetos de caldeiras (VAMVUKA; SFAKIOTAKIS, 2011; YUZBASI; SELÇUK, 2011; MOON et al., 2013).

Pelo exposto, são muitas as propriedades que podem interferir no uso energético da madeira e, se tratando de madeiras que são descartadas no lixo, poucas são as informações disponíveis na literatura. Assim, o objetivo foi avaliar o potencial energético dos resíduos de madeira presentes nos resíduos sólidos urbanos do município de Piracicaba – SP.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Material e Amostragem

Foram avaliados seis tipos de resíduos de madeira, a saber: a) madeira maciça, b) painéis MDF, c) painéis compensados, d) painéis aglomerado, e) painéis *orientad structure board* (OSB) e f) chapa dura.

As amostras foram cedidas por uma empresa do ramo de reciclagem de entulhos da construção civil que está instalada no município de Piracicaba – SP, Brasil. Esta empresa é habilitada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB a receber entulhos deste setor, porém, além destes, recebe entulhos provenientes do serviço de aluguel de caçambas da própria empresa.

A amostragem dos resíduos na pilha foi conduzida de acordo as descrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (2004) NBR 10007 (ABNT, 2004). Foram coletadas 240 amostras de resíduos de madeira maciça e 240 amostras de resíduos de painéis. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos e encaminhadas para o laboratório para posterior identificação e análises.

3.2.2 Propriedades físicas

Os valores de umidade foram medidos nos resíduos em suas formas originais, tal como coletado no campo. A norma utilizada foi a NBR 14929 (ABNT, 2003).

A densidade a granel foi realizada de acordo com norma NBR 6922 (ABNT, 1981). Para tanto, foram utilizadas amostras de cavacos industriais processados na própria usina de reciclagem onde foram coletados os resíduos. Parte dos cavacos foi encaminhada para as demais análises.

3.2.3 Composição química

O teor de lignina foi obtido conforme a norma TAPPI 222 05-74, (1974). O teor de extrativos totais foi obtido segundo a norma TAPPI T-264 (1993). O teor de holocelulose foi obtido por diferença.

3.2.4 Análise imediata

A análise imediata foi realizada para determinação dos materiais voláteis, cinzas e carbono fixo segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

3.2.5 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica modelo Ika C200 de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

3.2.6 Análise termogravimétrica

O equipamento utilizado para análise foi um SHIMADZU DTG-60H. O ensaio teve temperatura inicial de 30 e final de 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C. min⁻¹. Foi utilizado fluxo de nitrogênio de 50 mL. Foi utilizada a primeira derivada da curva de TG, que estabelece a perda de massa em função da temperatura, sendo possível identificar a taxa de perda de massa por segundo e os picos característicos da degradação térmica de biomassa.

Os parâmetros descritos nesta análise seguiram a rotina do laboratório para análise de biomassa lenhosa.

3.2.7 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) utilizando-se delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento (resíduos) e, quando necessário, foi aplicado o teste de Tukey para comparações múltiplas das médias. As análises foram realizadas com auxílio do software Minitab16.1® e do suplemento Action da Microsoft Excel, todas a 95% de probabilidade.

3.3 Resultados e Discussão

Os resultados relativos aos diferentes tipos de resíduos, percentuais em massa seca, e respectivos valores de umidade, densidade a granel estão relacionados na Tabela 3.

Tabela 3.1 – Número de amostras, massa seca correspondente, umidade e densidade a granel.

Resíduos	N	MS (g) [%]	U (%)	DG (g.cm ⁻³)
Madeira Maciça	240	68.846,7 [56]	12,26 (34,07)	0,183 (1,01) a
Compensado	92	28.541,6 [23]	12,73 (34,32)	0,177 (5,17) a
Aglomerado	23	5.324,3 [4]	13,93 (31,16)	0,168 (2,94) a
MDF	76	12.487,8 [10]	15,00 (28,86)	0,104 (2,03) c
OSB	20	3.989,3 [3]	11,01 (40,01)	0,168 (4,96) a
Chapa dura	29	4.524,9 [4]	10,24 (42,85)	0,139 (1,06) b

N: número de amostras. MS: massa seca. U: umidade base úmida. DG: densidade a granel. Valores entre () são os coeficientes de variação dos resíduos analisados.

Analisando a Tabela 3.1 nota-se que, considerando o universo amostral, a maior participação foi para os resíduos de madeira maciça, com 56%. Dentro do grupo de painéis, os maiores números de amostras foram para resíduos de compensado, representando 23% do total de massa seca coletada, seguido pelos resíduos de MDF, aglomerado, chapa dura, e OSB, com 10%, 23%, 4%, 4% e 3% respectivamente.

Embora o número de amostras de madeira maciça e de painéis tenham sido iguais (240 amostras), os resíduos de madeira maciça apresentaram maior participação em massa seca (56%), quando comparado aos painéis (44%), e uma possível explicação talvez possa estar relacionado ao maior valor absoluto de densidade a granel encontrado para os resíduos de madeira maciça.

Em relação aos valores de umidade, o maior valor encontrado foi para os resíduos de MDF, com 15% de umidade, e o menor valor foi para chapa dura com 10,24%. Importante notar que a umidade dos resíduos encontra-se próximo à umidade de equilíbrio média do município de coleta, que é de 12,9% (JANKOWSKY; GALINA, 2013), o que do ponto de vista energético é satisfatório, pois menor seria o gasto energético para secagem completa do material.

Os valores encontrados para umidade estão de acordo com os relatados na literatura, conforme trabalho de Farage et al. (2013), que avaliaram resíduos de madeira do polo moveleiro de Ubá – MG, e encontraram valores de umidade para compensado de 22,7%, para MDF de 10,3%, para aglomerado variando de 9,8% a 10,3%, e para madeira maciça de 16,5% e 17,8%. A umidade de equilíbrio para o município de Ubá é de 14,37% (LIMA; MENDES, 1995), um pouco acima da informada para o município de Piracicaba e, deste modo, não deve sozinha, justificar a maior umidade dos compensados encontrado na literatura. Além da

influência das condições ambientais, há que se considerar as condições de amostragem, época do ano, tamanho da pilha e tempo de exposição dos resíduos às intempéries. Para os demais resíduos os valores ficaram próximos aos deste trabalho.

Para os resultados de densidade a granel, o maior valor observado foi para maciça com $0,183 \text{ g cm}^{-3}$, sendo estatisticamente igual ao compensado, aglomerado e OSB. Os painéis MDF e chapa dura foram os que apresentaram menor densidade $0,104 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,139 \text{ g cm}^{-3}$ respectivamente.

Farage et al. (2013) encontraram para densidade a granel de resíduos de MDF valores de 303 kg m^{-3} , e de madeira maciça de 200 kg m^{-3} , sendo este último próximo ao que foi encontrado neste trabalho.

Na Tabela 3.2 estão apresentados os teores de extrativos totais, de holocelulose e de lignina dos resíduos analisados.

Tabela 3.2 - Teores de extrativos totais, de holocelulose e de lignina

Resíduos	ET (%)	THO (%)	L (%)
Madeira Maciça	16,67 (1,14) a	51,76 (0,21) c	31,57 (0,94) bc
Compensado	12,14 (1,79) cd	53,21 (2,34) bc	34,65 (3,56) a
Aglomerado	12,51 (1,18) c	56,64 (0,46) b	30,84 (0,86) bc
MDF	14,26 (0,79) b	57,08 (2,01) b	28,65 (4,16) c
OSB	11,26 (0,91) d	55,63 (3,59) bc	33,10 (5,86) ab
Chapa dura	11,78 (7,69) cd	64,15 (3,86) a	24,06 (6,87) d

ET: teor de extrativos totais; THO: teor de holocelulose; L: teor de lignina; Valores entre () coeficiente de variação dos resíduos analisados.

Observa-se na Tabela 3.2 que o teor de extrativos totais médio para madeira maciça foi maior do que para os demais resíduos. Uma possível explicação pode estar na possibilidade deste segmento ser formado por um número desconhecido de madeiras tropicais, e que possivelmente apresente em sua constituição maiores teores de extrativos quando comparados a madeira de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, que tradicionalmente são utilizadas na fabricação de painéis reconstituídos. Outra explicação possível é a de que a ação do tempo, as intempéries, ou mesmo a presença de fungos, tenham levado a algum tipo de pré-degradação de alguns polissacarídeos da madeira, como as hemiceluloses, sendo que estes componentes degradados podem, por sua vez, terem sido removidos durante o procedimento de extração por solventes. Pode ter ocorrido ainda por meio da ação química destes solventes,

a retirada de eventuais substâncias presentes em revestimentos deste tipo de madeira, como vernizes e tintas. O termo “teor de extrativos totais” mencionado na Tabela 3.2, pode, portanto, representar não somente os extrativos originais da madeira, mas também outras substâncias oriundas de uma possível pré-degradação de componentes da madeira ou ainda pela presença de algum contaminante externo, que podem ter sido removidos durante o processo de extração, sendo necessária atenção na comparação com outros resultados descritos na literatura para madeiras ditas limpas.

O maior teor de holocelulose observado foi para resíduos de chapa, com 64,15% e o menor foi para maciça com 51,76%. Quanto aos teores de lignina, os maiores valores foram para OSB e compensado, com 33,10% e 34,65% respectivamente. Vale destacar que, tal como suposto para os extrativos totais, é possível que, o procedimento de determinação da lignina, por meio de ataque ácido, tenha “camuflado” eventuais substâncias que não necessariamente a lignina, como as já citadas tintas, colas, etc.

Os valores encontrados neste trabalho para análise química estão de acordo com os relatados por Moraes; Nascimento; Melo, (2005), que estudaram madeira de *Pinus oocarpa* e encontraram teores de extrativos de 11,8% e de lignina de 25,18%. Já em estudos feitos por Barbosa et al. (2014), os autores avaliaram resíduos de *Pinus elliottii* e encontraram teores de holocelulose de 61,79% e de lignina de 26,40%. Silva et al. (2014) estudaram quatro espécies de madeiras tropicais e encontraram teores de extrativos totais variando entre 3,55% e 7,68%, de holocelulose variando de 58,68% a 70,55%, e de lignina variando entre 25,13% e 33,64%.

Por outro lado, Ferreira (2013) encontrou para resíduos de MDF do setor moveleiro, valores para extrativos de 13,9% em água, para celulose de 50,7%, para hemicelulose de 22,3% e lignina de 13,1%. Neste caso, os valores de holocelulose (celulose + hemicelulose) ficaram 15,92% acima dos que foram encontrados neste trabalho, e de lignina 15,55% abaixo. Uma possível explicação pode estar no fato de se tratarem de resíduos de diferentes origens, cujas variações em relação às suas características químicas ainda não são bem conhecidas.

Na Figura 3.1 são apresentados os valores médios dos teores de cinzas, de materiais voláteis, de carbono fixo e poder calorífico superior dos resíduos analisados.

Figura 3.1 - Análise química imediata e poder calorífico superior dos diferentes resíduos

Os valores médios encontrados para os teores de carbono fixo se apresentam estatisticamente iguais para os resíduos analisados. O máximo valor observado para materiais voláteis foi de 82,64% para resíduos de madeira maciça.

Para os painéis os menores valores de materiais voláteis registrados quando comparados a madeira maciça podem ser explicados devido ao fato de que durante a fabricação destes materiais reconstituídos existirem etapas de secagem e prensagem do material (fibras e partículas) a altas temperaturas, levando desta forma a volatilização destes compostos.

Para os valores de cinza, os resultados variaram entre 0,9% e 1,7% para maciça e chapa dura respectivamente. Quanto ao poder calorífico superior, o maior valor observado foi para os resíduos de OSB, com 20117,57 kJ kg⁻¹ e o menor valor foi para MDF de 18191,65 kJ kg⁻¹, sendo que esse menor valor observado para MDF pode ser devido à perda de parte de lignina durante o processo de fabricação desse painel.

Os valores de poder calorífico superior, de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas estão próximos aos encontrados na literatura para diferentes biomassas lenhosas, conforme

relataram Farage et al. (2013) poder calorífico superior valores de 19811.94 kJ kg⁻¹ para MDF, de 19803.56 kJ kg⁻¹ para maciça, de 18501.47 kJ kg⁻¹ para compensado e de 18953.64 kJ kg⁻¹ para aglomerado.

Poletto; Júnior; Zattera, (2014) encontraram para MDF valores de 78,3% para materiais voláteis, 21,17% para carbono fixo, 0,53% para cinzas e 19005 kJ kg⁻¹ para poder calorífico.

Yorulmaz; Atimtay, (2009) analisando painéis MDF encontraram para materiais voláteis teores de 86,68%, para carbono fixo 11,06%, para cinzas 2,29%, e para poder calorífico superior de 19310 kJ kg⁻¹.

Souza et al. (2012) encontraram para resíduos de *Pinus taeda* valores de materiais voláteis variando de 82,57% até 86,24 %, de carbono fixo variando de 13,44% até 17,01%, de cinzas variando de 0,20% a 0,42% e de poder calorífico superior variando entre 18987 kJ kg⁻¹ e 20624 kJ kg⁻¹.

Em estudo realizado por Silva et al. (2014) para quatro tipos de resíduos de madeiras tropicais, os autores encontraram valores de materiais voláteis variando entre 80,94% a 82,76%, de carbono fixo variando entre 16,99% – 18,94%, de cinzas variando entre 0,12% e 0,56%, e poder calorífico superior variando de 19292 kJ kg⁻¹ e 20632 kJ kg⁻¹.

Os resultados para teores de cinzas estão de acordo com os relatados por Farage et al. (2013), que encontraram teores de cinzas para MDF, maciça, compensado e aglomerado de 0,74%; 0,48%; 0,79% e 0,95% respectivamente.

Ao se comparar os valores encontrados neste trabalho com os descritos na literatura, pode-se inferir que, guardadas as devidas proporções, os resíduos de madeira de origem urbana apresentam propriedades tecnológicas semelhantes a outros tipos de biomassa utilizadas para fins energéticos.

A perda de massa em função da temperatura (curva TG) dos resíduos é apresentada na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Perda de massa em função da temperatura para os diferentes resíduos lenhosos

É possível notar três regiões distintas: a 1ª região (com temperaturas de 30 a 230 °C) que é onde ocorrem a volatilização de água e extrativos, a 2ª região (com temperaturas de 230 a 370 °C) onde ocorrem a liberação de materiais voláteis, e a 3ª região (com temperaturas superiores a 370 °C) na qual acontecem reações de pirólise.

TGA-DTG

A análise das faixas de temperaturas deste trabalho é semelhante à encontrada por Kercher; Nagle, (2001) para painéis MDF, e próxima à faixa de inflamabilidade (270-280 °C) encontrada por Vamvuka; Sfakiotakis; Saxioni, (2015) para uma mistura de resíduos lenhosos urbanos.

Após 370 °C os resíduos de compensado e OSB foram os que apresentaram maior estabilidade térmica quando comparado aos demais. Uma possível explicação pode ser devido ao maior teor de lignina apresentado por estes destes resíduos. Este resultado está em conformidade com os encontrados por Sharma et al. (2004); Yang et al. (2006); Protásio et al. (2013), que verificaram que a lignina propicia maior estabilidade térmica quando comparado aos demais grupos moleculares, devido às ligações éter e carbono-carbono entre as unidades monoméricas de fenil-propano e, conseqüentemente, a estabilidade da sua matriz aromático, além do peso molecular elevado.

Ao final da análise a maior degradação ou perda de massa apurada foi para painéis MDF. Neste caso, para confirmar o raciocínio anterior, o esperado neste era que os resíduos de chapa dura também tivessem sofrido maior degradação ao final da análise, contudo, isso não foi observado. Uma possível explicação para isso pode estar na qualidade das possíveis e diferentes tipos de lignina, e nas diferentes ligações internas da macromolécula, para cada categoria de resíduos.

O fato da maioria dos resíduos de painéis terem apresentado maior estabilidade térmica quando comparado aos resíduos de madeira maciça, sugere que, as resinas utilizadas como agente ligante, bem como os diferentes tipos de revestimentos e acabamentos comuns na fabricação de painéis, possam apresentar maior estabilidade térmica do que a madeira maciça quando submetidas a ensaios de combustão, impressão esta que necessita ser confirmada por novas pesquisas.

A similaridade entre os resultados encontrados na literatura e os obtidos neste trabalho sugere um potencial promissor para uso destes resíduos para fins energéticos.

O gráfico das curvas de DTG dos resíduos analisados é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Curvas de DTG para os resíduos lenhosos analisados

Analisando as curvas de DTG (Figura 3.3), é possível notar uma certa similaridade entre as curvas observadas para maciça, aglomerado, OSB e MDF. Observa-se ainda a formação de um pico invertido de maior intensidade para os resíduos de chapa dura na faixa dos 340 °C, inferindo ser este o momento de máxima degradação das hemiceluloses deste material, que por sua vez, pode ser explicado pelo seu alto teor de holocelulose (64,15%) verificado durante as análises químicas. Entretanto, é importante destacar que tanto as celulosas quanto as ligninas também podem estar sofrendo perda de massa nesta temperatura considerada, uma vez que estes três constituintes estão na madeira intimamente ligados uns aos outros.

Resultados distintos foram observados por Protásio et al. (2013) com picos de degradação de 288,9 °C, e em trabalhos de Poletto et al. (2012) com pico de 300 °C para serragem de eucalipto.

Em trabalho de Kim et al. (2006) os autores definiram a faixa de 180 a 350 °C para degradação das hemiceluloses. Já Shafizadeh (1985), definiu a faixa de degradação para celulose estando entre 305 a 375 °C e de lignina entre 250 a 500 °C. Ainda nesta linha, Popescu et al. (2011) verificaram que os componentes da madeira se comportam de forma diferente se eles estão isolados ou intimamente ligados. Os autores estudaram a degradação de diferentes espécies de madeira e verificaram que a degradação da hemicelulose inicia em torno de 170 °C e estende-se até 380 °C; a degradação da lignina também inicia em 170 °C e estende-se até temperaturas acima de 600 °C; a degradação da celulose ocorre entre 280 e 400 °C.

3.4 Conclusões

Os resíduos de madeira presentes nos resíduos sólidos urbanos que foram analisados neste trabalho apresentaram características similares às tradicionais biomassas lenhosas utilizadas para fins energéticos e, portanto, exibem um potencial promissor para essa finalidade.

De maneira geral, os resíduos de madeira maciça e os resíduos de painéis de madeira apresentaram valores de propriedade físicas químicas e energéticas semelhantes entre si.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922: 1981**: Carvão vegetal – ensaios físicos determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: 1986**: Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633: 1984**: Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: 2004**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929: 2003**: Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.

BARBOSA, L. C.; PEDRAZZI, C.; DA SILVA FERREIRA, É.; SCHNEID, GUNTER NEUTZLING & WILLE, V. K. D. Evaluation of wood waste of one sawmill to kraft pulp production. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 491–500, 2014. Disponível em: <<http://www.bioline.org.br/request?cf14048>>. Acesso em: 20 maio. 2015.

BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. De. Influência da Época de Colheita e da Estocagem na Composição Química da Biomassa Florestal. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 1, p. 66–78, 2012.

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

FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. de C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de ubá - MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203–212, 2013.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (Mimosa scrabella, Benth) e aspectos gerais de combustão. (Série técnica). **FUPEF**, p. 14, 1981.

FERREIRA, S. D. **Estudo da viabilidade da conversão térmica de resíduos de fibra de média densidade (mdf)**. 2013. Universidade de Caxias do Sul, 2013.

JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de madeiras**, 2013. .

KERCHER, a. K.; NAGLE, D. C. TGA modeling of the thermal decomposition of CCA treated lumber waste. **Wood Science and Technology**, v. 35, n. 4, p. 325–341, 2001.

KIM, H. S.; KIM, S.; KIM, H. J.; YANG, H. S. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. **Thermochimica Acta**, v. 451, n. 1-2, p. 181–188, 2006.

LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Estimativa da umidade de equilíbrio para madeiras em trinta e duas cidades do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 19, n. 2, p. 272–276, 1995.

LYON, S.; BOND, B. **What is urban wood waste ?** v. 64, p. 166–170, 2014.

MACFARLANE, D. W. Potential availability of urban wood biomass in Michigan: Implications for energy production, carbon sequestration and sustainable forest management in the U.S.A. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 4, p. 628–634, abr. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953408002377>>. Acesso em: 20 maio. 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para Fins Energéticos**. MMA. Curitiba, 2009a. .

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. MMA. Curitiba, 2009b. .

MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232–240, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.01.019>>.

MORAIS, S. A. L. de; NASCIMENTO, E. A. do; MELO, D. C. de. Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461–470, jun. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000300014&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 20 maio. 2015.

POLETTTO, M.; JÚNIOR, H.; ZATTERA, A. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. **Materials**, v. 7, n. 9, p. 6105–6119, 25 ago. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1944/7/9/6105/htm>>. Acesso em: 20 maio. 2015.

POLETTTO, M.; ZATTERA, A. J.; FORTE, M. M. C.; SANTANA, R. M. C. Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. **Bioresource Technology**, v. 109, p. 148–153, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.122>>.

POPESCU, M.-C.; POPESCU, C.-M.; LISA, G.; SAKATA, Y. Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods. **Journal of Molecular Structure**, v. 988, n. 1-3, p. 65–72, mar. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022286010009518>>. Acesso em: 21 maio. 2015.

PROTÁSIO, T. de P.; MELO, I. C. N. A. de; GUIMARÃES JUNIOR, M.; MENDES, R. F.; TRUGILHO, P. F. Thermal decomposition of torrefied and carbonized briquettes of residues from coffee grain processing. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 3, p. 221–228, jun. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542013000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 21 maio. 2015.

SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: *Fundamentals of Biomass Thermochemical Conversion*. Elsevier, p. 183–217, 1985.

SHARMA, R. K.; WOOTEN, J. B.; BALIGA, V. L.; LIN, X.; CHAN, W. G.; HAJALIGOL, M. R. Characterization of chars from pyrolysis of lignin. **Fuel**, v. 83, n. 11-12, p. 1469–1482, 2004.

SILVA, D. A. da; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B. de. Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 561–568, 2014.

SOUZA, M. M. de; SILVA, D. A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. dos. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **FLORESTA**, v. 42, n. 2, p. 325, 28 jun. 2012. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/floresta/article/view/26593>>. Acesso em: 20 maio. 2015.

TAPPI 222 05-74. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi: Acid insoluble lignin in wood and pulp**. Standart Methods. Atlanta: n.p. 1974.

TAPPI T264. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi: Preparation of wood for chemical analysis**. Standart Methods. Atlanta: n.p. 1993.

VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S. Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. **Thermochimica Acta**, v. 526, n. 1-2, p. 192–199, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2011.09.021>>.

VAMVUKA, D.; SFAKIOTAKIS, S.; SAXIONI, S. Evaluation of urban wastes as promising co-fuels for energy production – A TG/MS study. **Fuel**, v. 147, p. 170–183, maio 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236115000848>>. Acesso em: 27 mar. 2015.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-Depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicellulose, Cellulose and Lignin. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 1, p. 388–393, jan. 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/ef0580117>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

YORULMAZ, S. Y.; ATIMTAY, A. Investigation of combustion kinetics of five waste wood samples with thermogravimetric analysis. **Environmental Earth Sciences**, v. 90, n. 7-8, p. 511–520, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.02.010>>.

YUZBASI, N. S.; SELÇUK, N. Air and oxy-fuel combustion characteristics of biomass/lignite blends in TGA-FTIR. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 5, p. 1101–1108, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.005>>.

4 ALTERAÇÕES PROVOCADAS PELA TORREFAÇÃO SOBRE RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA

Resumo

Neste trabalho foram caracterizados resíduos de madeira de origem urbana quando submetidos ao tratamento térmico da torrefação. Foram avaliadas cinco composições (tratamentos) de resíduos, contendo diferentes porcentagens de madeira maciça e de painéis reconstituídos, provenientes do município de Piracicaba – SP. A torrefação foi realizada em forno elétrico, com atmosfera saturada em gás nitrogênio, temperatura de 280 °C, durante 60 minutos. Foram analisadas as propriedades físicas, químicas e energéticas no material *in natura* e torrado. Os resultados demonstraram que a torrefação possibilitou incrementos significativos e positivos nos teores relativos de lignina insolúvel, teor de carbono fixo e poder calorífico superior. Observou-se redução significativa nos teores de extrativos totais, materiais voláteis, densidade a granel e densidade energética. A torrefação não influenciou nos teores de cinzas, no entanto, mostrou-se eficiente para melhoria da moabilidade dos resíduos torrados. O rendimento da torrefação foi afetado tanto pelas características do processo quanto pela composição dos tratamentos avaliados.

Palavras-chave: Pirolise leve; Degradação térmica; Biomassa lenhosa; Energia

Abstract

This work analyzed torrefied wood waste from urban origin. Five compositions of residues (treatments), compound by solid wood and panels, from a recycling station. The torrefaction performed in an electric furnace, within an inert atmosphere saturated with nitrogen gas, and had temperature of 280 °C for 60 minutes. The physical, chemical and energetic properties of raw and torrefied materials were measured. The analysis exhibited that the torrefaction process led to an increases of acid-insoluble lignin content, fixed carbon content and higher heating value. It was observed, observed a reduction of extractives, volatile matter, bulk density and energy density. The torrefaction did not affect the ash content, however, proved effective to improving the grindability of the residues. In addition, the characteristics of process and samples composition influenced the gravimetric yield of torrefaction.

Keywords: Mild pyrolysis; Thermal degradation; Woody biomass; Wood energy

4.1 Introdução

O uso de resíduos de madeira como matéria-prima para uso energético é uma realidade em muitas regiões do mundo, seja pelo seu baixo custo de aquisição ou pelas facilidades de obtenção, devido à sua geração ser amplamente distribuída. Contudo, para os resíduos de madeira gerados em atividades urbanas, como resíduos de móveis velhos, obras de construção

e demolição, caixas de transporte e obras civis, a realidade, em muitas regiões, ainda envolve aspectos de marginalização.

Dados oficiais do Ministério do Meio Ambiente (MMA) estimam que no Brasil, somente o setor da construção civil e as áreas urbanas sejam responsáveis pela geração de 2,79 milhões de toneladas de resíduos de madeira, para os quais os destinos mais comuns são os aterros de obras civis, aterro sanitário, aterro de inertes, estações de reciclagem e, deposição irregular (MMA, 2009).

A composição destes resíduos pode ser considerada complexa, devido ao fato de serem formados por um grande e desconhecido número de componentes, cujas dimensões e valores de umidade apresentam, geralmente, grandes variações. Além disso, são caracterizados por apresentar baixo valor calórico, natureza higroscópica, baixa densidade e grandes volumes, o que resulta em uma baixa eficiência de conversão energética, bem como em dificuldades de coleta, moagem, armazenamento e transporte (CHEN; PENG; BI, 2015). Para tratar essa biomassa lenhosa, visando maximizar suas características energéticas, tem sido estudado em todo o mundo, o tratamento térmico da torrefação (REPELLIN et al., 2010). Esta técnica é conhecida como um processo de pirólise leve, que ocorre dentro da faixa de temperatura 200 a 300 °C, na ausência de oxigênio e com baixas taxas de aquecimento (BERGMAN; VERINGA, 2005), podendo variar de poucos minutos a algumas horas (CHEN et al., 2013).

O processo de degradação térmica implica em mudanças nas propriedades tecnológicas (PIERRE et al., 2011), como perda da afinidade por moléculas de água devido à remoção de grupos hidroxílicos presentes na estrutura química da madeira (BOURGOIS; BARTHOLIN; GUYONNET, 1989; KHAZRAIE SHOULAIFAR et al. 2012). Dessa forma, tem-se um processo em que as paredes celulares são degradadas e a natureza do produto resultante encontra-se entre a madeira e o carvão vegetal (PIERRE et al., 2011).

Como resultado, a absorção de umidade pelo material torrado poderá ser limitada entre 1 e 6% (BERGMAN et al., 2005). Outras respostas indicam redução no tempo gasto para a ignição do material (BRIDGEMAN et al., 2008). ALMEIDA ; BRITO; PERRÉ, (2009) descreveram que se o tratamento for realizado em temperaturas superiores a 220 °C poderá ocorrer um aumento da estabilidade da madeira torrada, trazendo vantagens significativas para o transporte e armazenamento do material.

Além destas, foram observadas melhorias no tempo de queima devido ao maior teor de carbono fixo (BERGMAN; KIEL, 2005; BRIDGEMAN et al., 2008; PIERRE et al., 2011;

MEDIC et al., 2012), aumento do poder calorífico (BOURGOIS; GUYONNET, 1988; BERGMAN et al., 2005; ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2010), aumento da densidade energética (CHEW; DOSHI, 2011), menor produção de fumaça em comparação com madeira original (PENTANANUNT; RAHMAN; BHATTACHARYA, 1990), perda de tenacidade e de parte da estrutura fibrosa, que acarretará em redução no gasto com energia para transformar o material em pó (BERGMAN et al., 2005; ARIAS et al., 2008; SHANG et al., 2012), e possibilidade de uso da sua forma pulverizada em caldeiras e altos-fornos (CHEN et al., 2011a).

A torrefação se apresenta, portanto, como uma rota de grande potencial para melhorar as características da biomassa visando o uso energético. Entretanto, há carências de estudos relacionados ao uso da torrefação, no sentido de melhorar as características de resíduos de madeiras provenientes do meio urbano. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo avaliar as alterações provocadas pela torrefação nas características físicas, químicas e energéticas desse tipo de material, em diferentes composições.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Material

Foram avaliadas composições de resíduos de madeira de origem urbana coletados em uma empresa do ramo de reciclagem de entulhos da construção civil que está instalada no município de Piracicaba – SP, Brasil. Esta empresa é habilitada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB a receber entulhos deste setor, porém, além destes, recebe entulhos provenientes do serviço de aluguel de caçambas da própria empresa.

O procedimento de amostragem dos resíduos obedeceu às descrições contidas na norma ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (2004) NBR 10.007 (ABNT, 2004), onde, no momento da coleta os resíduos foram divididos em madeira maciça e painéis reconstituídos. A categoria de painéis reconstituídos é formada por uma amostra composta por 23% de painel compensado, 4% de painel aglomerado, 10% de painel MDF, 3% de painel OSB e 4% de painel chapa dura, sendo a porcentagem associada a cada tipo de painel equivalente a realidade da amostra coletada em campo. De forma antecedente ao estabelecimento dos tratamentos, os cavacos de madeira maciça e de painéis, foram, de forma separada, submetidos a um processo de homogeneização com auxílio de uma betoneira, por 10 minutos. Após esse tempo, os resíduos contidos no interior da betoneira passaram por um

processo de quarteamento para retirada das amostras que seriam submetidas ao ensaio da torrefação e posterior caracterização física, química e energética. Cada tratamento foi analisado na sua forma de cavacos *in natura* e na forma de cavacos torrados, conforme apresenta a Tabela 4.1. Foram utilizados cavacos que passaram pela peneira de 31,5 mm de abertura.

Tabela 4.1 - Tratamentos analisados, composição e condições de avaliação.

Tratamento	Composição	Condição 1	Condição 2
T1	100% Maciça	<i>In natura</i>	Torrado
T2	75% Maciça + 25% Painéis	<i>In natura</i>	Torrado
T3	50% Maciça + 50% Painéis	<i>In natura</i>	Torrado
T4	25% Maciça + 75% Painéis	<i>In natura</i>	Torrado
T5	100% Painéis	<i>In natura</i>	Torrado

4.2.2 Processo térmico de torrefação

As torrefações foram realizadas em uma estufa elétrica Fanem – Modelo 320-Digital, dotada de um sistema de aquecimento por resistência elétrica e circulação forçada de ar interno, com volume nominal de 450 litros (Figura 4.1). As amostras, no estado absolutamente seco, foram inseridas no interior de câmaras de torrefação hermeticamente fechadas, dotadas de porta de acesso e orifícios destinados à inserção de termopares para controle da temperatura, evacuação de gases do processo, e para a introdução de nitrogênio no interior da câmara de torrefação, visando uma atmosfera inerte. A injeção do nitrogênio teve início em 180 °C, conforme descrito por Rodrigues (2009), e se manteve até o final da torrefação. O fluxo de nitrogênio foi 30 mL min⁻¹, conforme descrito por Santos (2012). A temperatura inicial da estufa foi a ambiente (± 30 °C), e a temperatura da torrefação foi de 280 °C (± 5 °C), mantida nesta por 60 minutos. A taxa de aquecimento foi de 1,5 °C min⁻¹ e o tempo total foi de 3h13min. A definição da temperatura final de 280 °C foi baseada nos resultados obtidos por Arias et al. (2008); Rodrigues (2009); Dhungana; Dutta; Basu, (2012); Santos (2012). O patamar final de 60 minutos e a respectiva taxa de aquecimento foram definidos com base em ensaio piloto.

Figura 4.1 - Sistema de torrefação: A: Conjunto aquisitor dos dados (Computador + datalogger); B: Cilindro de Nitrogênio; C: Orifícios para injeção de N, inserção de termopares e saída de gases; D: Estufa Elétrica; E: Câmara de torrefação

4.2.3 Análises realizadas

A caracterização dos tratamentos *in natura* e torrados foi baseada nas análises a seguir:

- O teor de extrativos totais foi determinado segundo a norma TAPPI T-264 (TAPPI, 1993); O teor de lignina total foi realizado conforme a norma TAPPI 222 05-74, (TAPPI, 1974).
- A análise imediata foi realizada para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).
- A densidade a granel foi determinada de acordo com norma NBR 6922 (ABNT, 1981).
- O poder calorífico superior foi determinado com a amostra absolutamente seca utilizando uma bomba calorimétrica modelo Ika C200 de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).
- A densidade energética foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior pelos respectivos valores de densidade a granel.
- A moagem dos cavacos foi processada em um moinho centrifugal Jokro-Muhle, tendo como base metodológica a norma MERK-BLATT V/105-VZIPC (*Verein der Zellstoff und Papier Chemiker und Ingenieure*). A análise granulométrica dos cavacos *in natura* e torrados foi realizada utilizando um jogo de peneiras granulométricas de 31,5; 16,0; 8,0; 4,0 e <4,0 mm de abertura.
- O rendimento gravimétrico da torrefação foi obtido através do cálculo da relação entre a quantidade de material após o tratamento e a quantidade do material antes do tratamento (seca), conforme eq. (1):

$$\text{Rendimento Torrefação (\%)} = \frac{\text{Massa Torrificada (g)}}{\text{Massa original (g)}} \times 100 \quad (1)$$

4.2.4 Análise dos dados

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) utilizando-se delineamento inteiramente casualizado (DIC) com cinco repetições por tratamento e, quando necessário, foi aplicado o teste de Tukey para comparações múltiplas das médias. As análises foram realizadas com auxílio do software Minitab16.1® e do suplemento Action da Microsoft Excel, todas a 95% de probabilidade.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Propriedades químicas dos resíduos

Na Tabela 4.2 estão os resultados das análises de extrativos totais, lignina insolúvel.

Tabela 4.2 – Resultados de extrativos totais e lignina insolúvel.

Trat.	Extrativos totais (%)		Lignina insolúvel (%)	
	<i>In natura</i>	Torrado	<i>In natura</i>	Torrado
T1	21,37 ^{aA} (13,89)	10,8 ^{aB} (15,99)	31,46 ^{aB} (3,79)	55,22 ^{dA} (1,09)
T2	14,63 ^{bA} (2,78)	9,43 ^{aB} (2,78)	31,00 ^{aB} (3,45)	55,71 ^{dA} (1,44)
T3	14,86 ^{bA} (1,37)	9,40 ^{aB} (6,39)	30,06 ^{aB} (4,67)	61,53 ^{cA} (1,16)
T4	13,99 ^{bA} (4,48)	9,65 ^{aB} (7,27)	28,08 ^{bB} (2,88)	72,11 ^{bA} (0,67)
T5	14,42 ^{bA} (2,09)	9,23 ^{aB} (8,56)	27,26 ^{bB} (4,40)	84,28 ^{aA} (0,77)

T: tratamento. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si considerando um mesmo tratamento ($p > 0,05$). Letras minúsculas comparam valores entre colunas, para cada característica de forma separada, e letras maiúsculas comparam valores entre linhas. Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação da análise.

Segundo Hakkou et al. (2006); Pierre et al. (2011); Silva (2012), a redução no teor de extrativos é devido ao aumento da degradação térmica dos compostos neles presentes, principalmente em temperaturas iguais ou superiores a 240 °C e com perda de massa superior a 6%. O efeito da torrefação sobre o teor de extrativos totais foi mais efetivo para o tratamento T1, que variou de 21,3% para 10,8%, correspondendo a uma redução de 49,5% no valor desta propriedade. Para os demais tratamentos, cujas composições continham adição de resíduos de painéis, a redução foi, em média, de 34,8%.

O tratamento T1 exibiu o mais elevado teor de extrativos, e uma hipótese para isso pode ser devido ao fato deste tratamento ser formado por um grande número de espécies tropicais com características químicas desconhecidas. Outra explicação é a possibilidade de que os solventes utilizados na extração tenham removido além dos tradicionais extrativos da madeira, compostos de baixo peso molecular, como as hemiceluloses, que podem ter sido afetados pela ação de intempéries ou mesmo pela ação de fungos, além de uma possível ação dos solventes sobre prováveis revestimentos como tintas e vernizes, comuns nesta categoria de resíduos. Os menores teores encontrados nos tratamentos T2, T3 T4 e T5, podem ser explicados pelo fato de possuírem em sua composição, resíduos de painéis, fabricados exclusivamente com madeiras de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*. Além disso, é possível que os solventes utilizados na extração tenham removido além dos extrativos da madeira, algum outro componente estranho como tintas, vernizes e colas.

Quanto ao teor de lignina, a torrefação proporcionou incrementos em todos os tratamentos avaliados, sendo o tratamento T5 o que registrou o maior incremento de valor 209%. A lignina é descrita por Chen; Kuo, (2011) como sendo relativamente insensível à degradação térmica durante o processo de torrefação, e esse aumento no seu teor, deve-se segundo Esteves; Graça; Pereira, (2008), às reações de degradação das hemiceluloses e celulose. Essa relato feito por estes autores corrobora com estudo de Prins; Ptasiński; Janssen, (2006), no qual os autores descrevem que a hemicelulose é decomposta a uma temperatura na gama de 225 e 325 °C, a celulose em 305 e 375 °C e lignina gradualmente ao longo do intervalo de temperatura de 250 e 500 °C.

Vale salientar que os resultados tanto para os extrativos totais quanto para lignina insolúvel, obtidos nos tratamentos ditos torrados, utilizaram no procedimento de análise uma norma que foi redigida para análise química de madeira e, sendo assim, é também possível que os parâmetros mensurados não representem estritamente o valor destas propriedades.

4.3.2 Análise imediata dos resíduos

Na Tabela 4.3 observa-se os resultados encontrados para teor de materiais voláteis, de cinzas, e de carbono fixo.

Tabela 4.3 - Valores médios para análise imediata

Trat.	Materiais Voláteis (%)		Cinzas (%)		Carbono fixo (%)	
	<i>In natura</i>	Torrado	<i>In natura</i>	Torrado	<i>In natura</i>	Torrado
T1	81,82 ^{cA}		1,17 ^{cA}	1,1 ^{dA}		32,04 ^{dA}
	(0,88)	66,85 ^{aB} (0,44)	(11,74)	(10,63)	17,00 ^{aB} (3,74)	(0,86)
T2	85,28 ^{bA}	65,26 ^{abB}	1,12 ^{cA}	1,29		33,43 ^{cdA}
	(4,50)	(0,84)	(16,37)	^{cdA} (5,30)	13,59 ^{bB} (27,90)	(1,56)
T3	90,43 ^{aA}		1,97 ^{abA}	1,39 ^{cB}		
	(3,09)	62,15 ^{bB} (1,72)	(3,61)	(16,62)	7,59 ^{cB} (37,67)	36,45 ^{cA} (2,47)
T4	89,17 ^{aA}			2,13 ^{bA}		41,62 ^{bA}
	(0,87)	56,24 ^{cB} (2,43)	1,93 ^{bB} (4,06)	(5,47)	8,89 ^{cB} (9,01)	(3,42)
T5	89,20 ^{aA}			3,01 ^{aA}		
	(1,85)	46,37 ^{dB} (0,37)	2,18 ^{aB} (7,60)	(4,00)	8,61 ^{cB} (20,22)	50,60 ^{aA} (0,53)

T: tratamento. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si considerando um mesmo tratamento ($p > 0,05$). Letras minúsculas comparam valores entre colunas, para cada característica de forma separada, e letras maiúsculas comparam valores entre linhas. Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação da análise.

Nota-se pela Tabela 4.3, que a torrefação levou a uma considerável redução nos teores de materiais voláteis em todos os tratamentos. O tratamento T5 foi o que apresentou a maior redução no valor desta propriedade (48%), quando comparados os resultados dos resíduos *in natura* e torrados. Ao observar os demais tratamentos, nota-se que o efeito da torrefação sobre o teor de materiais voláteis foi mais pronunciado para aqueles tratamentos que continham uma maior participação de painéis na sua composição, como T5, T4 e T3 respectivamente.

Os materiais voláteis são formados principalmente por líquidos condensáveis como H₂O, produtos orgânicos, lipídios e também por componentes não condensáveis ou fração gasosa permanente, como CO e CO₂ principalmente (CHEN et al., 2011b). Além destes, a torrefação pode levar a eliminação de produtos gasosos derivados de compostos de nitrogênio, como HCN, NO_x durante combustão e NH₃, HNCO, HCN durante a pirólise. Estes compostos podem ter sua origem a partir de vernizes e adesivos, como ureia formaldeído e melanina formaldeído, comuns por exemplo, em resíduos de painéis de madeira (GIRODS et al., 2008a, 2008b, 2008c; DEBAL et al., 2014). A eliminação destes compostos voláteis durante a torrefação é um fator intrínseco ao processo, conforme relataram Lee et al. (2012); Gucho et

al. (2015) e segundo Van Der Stelt et al. (2011), podem conter cerca de 10% de toda a energia da biomassa.

Portanto, a redução no teor de materiais voláteis nos tratamentos torrados em comparação com os tratamentos *in natura* pode ser vista como uma vantagem estratégica da torrefação no sentido de que essa poderia proporcionar uma “limpeza térmica dos resíduos”, uma vez que eventuais compostos voláteis tidos como nocivos poderiam ser liberados e captados na forma de gases durante o processo de torrefação. Esses voláteis poderiam ser tratados posteriormente o que corroboraria para a promoção sustentável do uso destes resíduos, considerados atualmente de baixo valor agregado.

Com relação ao teor de cinzas, não foi registrada nenhuma tendência, seja de aumento ou diminuição nos seus valores. Durante o tratamento térmico o esperado é que os minerais formadores das cinzas passem inertes pelo processo de torrefação, sendo os resultados expressos em termos de valores relativos. Contudo, trata-se de uma propriedade de grande importância para uso de resíduos de madeira de origem urbana, pois, quanto maior o seu teor, sejam em resíduos *in natura* ou torrados, maior poderá ser o desgaste de ferramentas de corte para moer e triturar tais materiais (SOUZA et al., 2009) e menor o poder calorífico (BRAND, 2010). O aumento das cinzas resultantes da combustão também poderá ocorrer (KROOK; MÅRTENSSON; EKLUND, 2004; BRAND, 2010), levando a limpezas mais frequentes em fornos e caldeiras, bem como, segundo Debal et al. (2014), a existência de problemas de entupimento e incrustações durante processos termoquímicos.

O teor de carbono fixo foi o que registrou as maiores diferenças na comparação de materiais *in natura* e os torrados. Neste caso, houve incremento no valor desta propriedade para todos os tratamentos, sendo o maior incremento de 487% para o tratamento T5. A torrefação de fato proporciona aumento no teor de carbono fixo, conforme foi relatado por Bergman; Kiel, (2005); Medic et al. (2012) e um aumento no valor desta propriedade pode significar, em termos práticos, uma queima mais duradoura, em comparação com materiais de menor teor de carbono fixo (BRIDGEMAN et al., 2008).

4.3.3 Propriedades físicas e energéticas dos resíduos

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados para densidade a granel, poder calorífico superior e densidade energética para os tratamentos propostos.

Tabela 4.4 - Valores médios de densidade a granel (DG), poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (DE)

Trat.	DG (kg m ⁻³)		PCS (kJ kg ⁻¹)		DE (kJ m ⁻³)	
	<i>In natura</i>	Torrado	<i>In natura</i>	Torrado	<i>In natura</i>	Torrado
T1	233,55 ^{aA}	184,48 ^{aB}	19182,240 ^{abB}	22453,810 ^{bA}	4480349,0 ^{aA}	4142366,0 ^{aB} (1,34)
	(1,01)	(1,25)	(4,74)	(0,62)	(4,99)	
T2	221,82 ^{bA}	158,08 ^{bB}	19554,870 ^{aB}	22444,600 ^{bA}	4337683,0 ^{aA}	3548070,0 ^{bB}
	(1,98)	(0,43)	(0,30)	(0,33)	(1,85)	(0,38)
T3	201,36 ^{cA}	146,91 ^{cB}	19100,180 ^{abB}	22705,020 ^{bA}	3846119,0 ^{bA}	3335663,0 ^{cB}
	(2,96)	(1,28)	(0,32)	(1,26)	(2,93)	(1,83)
T4	189,40 ^{dA}	128,61 ^{dB}	19153,770 ^{abB}	23492,970 ^{aA}	3627427,0 ^{cA}	3021514,0 ^{dB}
	(5,90)	(1,19)	(0,35)	(0,74)	(5,67)	(1,18)
T5	187,23 ^{dA}	109,71 ^{eB}	18708,300 ^{bB}	23841,310 ^{aA}	3502979,0 ^{cA}	2615843,0 ^{eB}
	(1,28)	(1,84)	(0,29)	(1,13)	(1,50)	(2,35)

T: tratamento. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si considerando um mesmo tratamento ($p > 0,05$). Letras minúsculas comparam valores entre colunas, para cada característica de forma separada, e letras maiúsculas comparam valores entre linhas. Valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação da análise.

Ao observar a Tabela 4.4 é possível notar que o efeito da torrefação sobre a densidade a granel foi mais pronunciada para os tratamentos que continham uma maior porcentagem de resíduos de painéis em sua composição. Neste caso, a maior diferença entre a densidade do material *in natura* e do torrado foi para o tratamento T5, com 41% de redução. O comportamento observado para demais tratamentos foi similar ao descrito anteriormente, ou seja, quanto maior a porcentagem de painéis, maior a perda de massa registrada.

Essas reduções nos valores de densidade a granel podem ser interpretadas em função das diferentes perdas de massa observada entre os tratamentos, das diferenças entre as composições de cada tratamento e da temperatura e tempo de residência utilizados neste trabalho. As tendências estão concordantes com os resultados encontrados por Almeida; Brito; Perré, (2009) que trabalharam com diferentes espécies de madeira, em diferentes condições de temperatura, e verificaram perdas de massa superiores a 25%, quando a temperatura utilizada é a de 280 °C.

Um aumento considerável nos valores de poder calorífico superior pode ser notado ao se analisar os resultados *in natura* e torrados. Os aumentos registrados situam-se entre 14,7% e 27,4%, para os tratamentos T2 e T5 respectivamente. Segundo Almeida; Brito; Perré,

(2010), o aumento do poder calorífico proporcionado pela torrefação indica um aumento da qualidade do produto em comparação com a biomassa não torrada. Os resultados encontrados estão condizentes com os obtidos por Bergman et al. (2005); Chen et al., (2011^a); Phanphanich; Mani, (2011).

Por outro lado, a densidade energética, que é calculada a partir dos resultados de densidade a granel e do poder calorífico, registrou uma significativa redução nos seus valores quando comparados os materiais *in natura* e torrados. Neste caso, a redução no valor desta propriedade ficou entre 7,5% e 25,3%, para os tratamentos T1 e T5, respectivamente.

Este cenário de redução nos valores de densidade energética não é desejável, pois significaria perdas de energia e, embora Viguié et al. (2013) tenham relatado que uma perda de massa aceitável máxima para a torrefação fosse de 30%, é possível que, mesmo que as perdas situem-se dentro deste limite e, ainda que hajam incrementos no valores de poder calorífico, como os registrados neste trabalho, a densidade energética do material torrado possivelmente não seja satisfatória, em comparação com o material *in natura*. Quando isso acontece é necessário que sejam feitos ajustes nos parâmetros do processos, como temperatura de torrefação, tempo de residência, e tipo de biomassa, conforme alertaram Almeida; Brito; Perré, (2010); Neupane et al. (2015).

Há que se destacar que a densidade energética, em si mesma, não é o único parâmetro a ser considerado para a definição do resultado da torrefação. A qualidade do material, dependendo da aplicação pretendida, pode também ser expressa em função de ganhos qualitativos nas características da biomassa, como maior homogeneidade, maior resistência a degradação biológica durante estocagem, menor valor de umidade, e possibilidades de descontaminação por alguns produtos químicos, por exemplo, podem trazer compensações importantes.

A Figura 4.2 apresenta os resultados referentes ao ensaio de moagem realizados nos resíduos *in natura* e torrados.

Figura 4.2 - Distribuição do tamanho das partículas em diferentes peneiras (aberturas) (% de massa seca retida nas peneiras). (A) = antes e (D) = depois.

Pelos resultados expostos na Figura 4.2 é possível notar o efeito da torrefação sobre a resistência à moagem das partículas de madeira *in natura* e torradas. Para as partículas de maiores dimensões (peneira 16,0 mm de abertura), a retenção do material torrado após a moagem (D) foi de 0%, ou seja, houve redução de 100% no tamanho de suas partículas. Essa maior friabilidade do material torrado pode também ser notada para a peneira de 8,0 mm de abertura, em que é possível verificar uma menor retenção do material torrado após a moagem (D) nesta peneira, em comparação com o material *in natura* após a moagem (D), para todos os tratamentos avaliados.

Para as partículas menores que 4,0 mm, após a moagem (D), é possível notar, aumento considerável de partículas do material torrado em comparação com os materiais *in natura*, também após o processo de moagem (D). Isto se deve a intensa fragmentação das partículas que passaram pelas peneiras de 16,0; 8,0 e; 4 mm respectivamente, fazendo com que essas partículas mais finas se acumulassem no fundo das peneiras (<4,0 mm).

A moagem de biomassa torrada tem seu efeito prático relatado por Bergman et al. (2005) em que foram observadas reduções no consumo de eletricidade no processo de moagem entre 50 e 85% quando comparado à madeira torrada. Phanphanich; Mani, (2011) também relataram que é possível diminuir a energia para a moagem de forma significativa

com o emprego da torrefação. Bridgeman et al. (2010) descreveram que além do menor gasto com energia para moagem, o pó resultante apresentaria boas propriedades de fluidização.

A Figura 4.3 ilustra os resultados médios dos rendimentos das torrefações para os cinco tratamentos.

Figura 4.3 - Rendimento gravimétrico da torrefação para os diferentes tratamentos. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si considerando um mesmo tratamento ($p > 0,05$)

Na Figura 4.3 é possível perceber uma redução no rendimento da torrefação à medida em que os tratamentos apresentam em sua composição maiores porcentagens de resíduos de painéis. A diferença entre o rendimento da torrefação do tratamento T1 ao T5 é da ordem de 18,82%, sendo maior para o tratamento T1. Percebe-se claramente uma significativa influência da torrefação sobre aqueles tratamentos com maiores porcentagens de painéis, sendo este resultado de suma importância para o ajuste dos parâmetros do processo de forma a maximizar os rendimentos e a qualidade final da biomassa torrada.

Viguié et al. (2013) descrevem que um rendimento típico para a massa de material sólido (base seca) é de aproximadamente 70% e, ao estabelecer este valor como referência, os tratamentos T1, T2 e T3 situam-se dentro do padrão descrito por este autor. Uma explicação possível para os tratamentos T4 e T5 terem apresentado rendimentos inferiores a 70% pode estar relacionado ao que afirmou Cavagnol et al. (2015) que consideram que, embora o processo de torrefação seja endotérmico, algumas reações exotérmicas podem aparecer em temperaturas superiores a 250 °C, e que estas reações podem produzir temperaturas excedentes, gerando zonas sobreaquecidas dentro da câmara de torrefação, com consequência

direta sobre o tratamento de certas partículas. Ainda segundo os autores, a temperatura no núcleo interno dos cavacos irá impactar diretamente os rendimentos em massa da torrefação.

De maneira geral, observa-se que as diferenças encontradas entre os cinco tratamentos avaliados, independente da propriedade a ser considerada, demonstram a importância de se conhecer detalhes qualitativos da biomassa a ser torrada, bem como quais devem ser a temperatura e o tempo de residência a serem empregados, pois somente assim, a torrefação poderá ser conduzida adequadamente como uma alternativa ao pre-tratamento de resíduos de madeira de origem urbana, visando a sua readequação para uso energético.

4.4 Conclusões

A torrefação possibilitou incrementos significativos nos teores de lignina insolúvel, carbono fixo, poder calorífico superior. Possibilitou redução significativa nos teores de extrativos totais, materiais voláteis, densidade a granel e densidade energética.

A torrefação não influenciou no teor de cinzas, no entanto, mostrou-se eficiente para melhoria da moabilidade dos resíduos torrados em comparação com o material *in natura*.

O efeito da torrefação sobre o rendimento do processo foi afetado pelo tipo de biomassa tratada, bem como pela temperatura e tempo de residência utilizados no processo.

Referências

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**, v. 63, n. 1, p. 80–88, 2009.

ALMEIDA, G.; BRITO, J. O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: The potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9778–9784, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.07.026>>.

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**, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.

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

. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p. . 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986. 5p., 1986. .

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos sólidos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004. 21 p. . 2004.

BERGMAN, P.; BOERSMA, A.; KIEL, J.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K.; JANSSEN, F. J. Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. **2nd World conference and technology exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection**, p. 78–82, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX--04-029#page=78>>.

BERGMAN, P. C. a.; KIEL, J. H. a. Torrefaction for biomass upgrading. **Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France**, n. October, p. 17–21, 2005. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Torrefaction+for+biomass+upgrading#0>>.

BERGMAN, P. C. a.; VERINGA, H. J. Combined torrefaction and pelletisation. **Analysis**, n. July, p. 29, 2005. Disponível em: <<http://www.ecn.nl/publications>>.

BOURGOIS, J.; BARTHOLIN, M. C.; GUYONNET, R. Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. **Wood Science and Technology**, v. 23, n. 4, p. 303–310, 1989.

BOURGOIS, J.; GUYONNET, R. Characterization and analysis of torrefied wood. **Wood Science and Technology**, v. 22, n. 2, p. 143–155, 1988.

BRAND, M. A. **Energia da biomassa florestal**. Editora In ed. [s.l: s.n.]

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**, v. 87, n. 6, 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**, v. 89, n. 12, p. 3911–3918, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.043>>.

CAVAGNOL, S.; ROESLER, J. F.; SANZ, E.; NASTOLL, W.; LU, P.; PERRÉ, P. Exothermicity in wood torrefaction and its impact on product mass yields: From micro to pilot scale. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 93, n. 2, p. 331–339, 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/cjce.22128>>.

CHEN, W. H.; CHENG, W. Y.; LU, K. M.; HUANG, Y. P. An evaluation on improvement of pulverized biomass property for solid fuel through torrefaction. **Applied Energy**, v. 88, n. 11,

p. 3636–3644, 2011a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.040>>. CHEN, W. H.; KUO, P. C. Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. **Energy**, v. 36, n. 11, p. 6451–6460, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.022>>.

CHEN, W. H.; LU, K. M.; LIU, S. H.; TSAI, C. M.; LEE, W. J.; LIN, T. C. Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. **Bioresource Technology**, v. 146, n. x, p. 152–160, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.064>>.

CHEN, W.; HSU, H.; LU, K.; LEE, W.; LIN, T. Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 3012–3021, 2011b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.045>>. CHEN, W.-H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 847–866, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114010910>>.

CHEW, J. J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 4212–4222, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.017>>.

DEBAL, M.; GIRODS, P.; LÉMONON, J.; KARAMA, J. P.; DONNOT, A.; ROGAUME, Y. TG-FTIR kinetic study of the thermal cleaning of wood laminated flooring waste. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 118, n. 1, p. 141–151, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10973-014-3942-9>>.

DHUNGANA, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of non-lignocellulose biomass waste. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 90, n. 1, p. 186–195, 2012.

ESTEVES, B.; GRAÇA, J.; PEREIRA, H. Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood. **Holzforschung**, v. 62, p. 344–351, 2008.

GIRODS, P.; DUFOUR, a.; ROGAUME, Y.; ROGAUME, C.; ZOULALIAN, a. Thermal removal of nitrogen species from wood waste containing urea formaldehyde and melamine formaldehyde resins. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 2-3, p. 210–221, 2008a.

GIRODS, P.; DUFOUR, A.; ROGAUME, Y.; ROGAUME, C.; ZOULALIAN, A. Pyrolysis of wood waste containing urea-formaldehyde and melamine-formaldehyde resins. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 81, n. 1, p. 113–120, 2008b. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237007001441>>.

GIRODS, P.; ROGAUME, Y.; DUFOUR, a.; ROGAUME, C.; ZOULALIAN, a. Low-temperature pyrolysis of wood waste containing urea-formaldehyde resin. **Renewable Energy**, v. 33, n. 4, p. 648–654, 2008c.

GUCHO, E.; SHAHZAD, K.; BRAMER, E.; AKHTAR, N.; BREM, G. Experimental Study on Dry Torrefaction of Beech Wood and Miscanthus. **Energies**, v. 8, n. 5, p. 3903–3923, 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/3903>>.

HAKKOU, M.; PÉTRISSANS, M.; GÉRARDIN, P.; ZOULALIAN, A. Investigations of the reasons for fungal durability of heat-treated beech wood. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, p. 393–397, 2006.

KHAZRAIE SHOULAIFAR, T.; DEMARTINI, N.; IVASKA, A.; FARDIM, P.; HUPA, M. Measuring the concentration of carboxylic acid groups in torrefied spruce wood. **Bioresource Technology**, v. 123, p. 338–343, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.069>>.

KROOK, J.; MÅRTENSSON, a.; EKLUND, M. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 41, n. 1, p. 1–14, 2004.

LEE, J. W.; KIM, Y. H.; LEE, S. M.; LEE, H. W. Optimizing the torrefaction of mixed softwood by response surface methodology for biomass upgrading to high energy density. **Bioresource Technology**, v. 116, p. 471–476, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.122>>.

MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, a.; POTTER, B.; ZIMMERMAN, J. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. **Fuel**, v. 91, n. 1, p. 147–154, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.019>>.

MMA. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. Curitiba, 2009.

NEUPANE, S.; ADHIKARI, S.; WANG, Z.; RAGAUSKAS, a J.; PU, Y. Effect of torrefaction on biomass structure and hydrocarbon production from fast pyrolysis. **Green Chem.**, 2015. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C4GC02383H>>.

PENTANANUNT, R.; RAHMAN, A. N. M. M.; BHATTACHARYA, S. C. Upgrading of biomass by means of torrefaction. **Energy**, v. 15, n. 12, p. 1175–1179, 1990.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 2, p. 1246–1253, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>>.

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**, v. 6, n. 2, p. 1204–1218, 2011.

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

REPELLIN, V.; GOVIN, A.; ROLLAND, M.; GUYONNET, R. Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 5, p. 602–609, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.002>>

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. Universidade de Brasília, 2009.

SANTOS, J. R. S. Dos. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. Juliana Rodrigues Siviero dos Santos Piracicaba. 2012.

SHANG, L.; FEI, Q.; ZHANG, Y. H.; WANG, X. Z.; FAN, D. Di; CHANG, H. N. Thermal Properties and Biodegradability Studies of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate). **Journal of Polymers and the Environment**, v. 20, n. 1, p. 23–28, 2012.

SILVA, M. R. da. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas, físicas e mecânicas em elementos estruturais de eucalipto citriodora e pinus taeda**. 2012. Universidade de São Paulo, 2012.

SOUZA, S. S. de; SANATOS, P. O. dos; VAREJÃO, M. de J. C.; NASCIMENTO, C. C. do. **DETECÇÃO DO TEOR DE CINZAS E SÍLICA EM MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS**. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/61ra/resumos/resumos/5044.htm>>. Acesso em: 14 maio. 2015.

TAPPI 222 05-74. **Tappi: Acid insoluble lignin in wood and pulp. rapport**, 1974.

TAPPI T264. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Tappi: Preparation of wood for chemical analysis**. Standart Methods. Atlanta: n.p. 1993

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. a; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>>.

VIGUIÉ, J.; ULLRICH, N.; POROT, P.; BOURNAY, L.; HECQUET, M.; ROUSSEAU, J. **BioTfuel Project**: Targeting the Development of Second-Generation Biodiesel and Biojet Fuels. v. 68, n. 5, 2013.

5 ESTIMATIVAS DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DE RESÍDUOS DE MADEIRA DE ORIGEM URBANA

Resumo

Este estudo foi realizado com o intuito de estimar por meio de análises de regressão linear simples algumas propriedades de resíduos de madeira de origem urbana após um procedimento de amostragem e tratamento térmico de torrefação. Foram formuladas diferentes composições de madeira maciça e de painéis reconstituídos provenientes de uma usina de reciclagem de resíduos urbanos localizada no município de Piracicaba, SP. Foram realizadas análises para determinação da umidade, densidade a granel, teor de extrativos, teor de lignina, teor de holocelulose, análise imediata, determinação do poder calorífico superior e calorífico útil e densidade energética. Os valores obtidos foram analisados por meio de análises de regressão com o intuito de obter equações com índices eficazes capazes de prever as características destes tipos resíduos de madeira. Os resultados sugerem que as equações obtidas foram eficazes na estimativa das propriedades analisadas, sendo, entretanto, recomendados estudos futuros para confirmar essas equações regressivas.

Palavras-chave: Energia da biomassa; Processo térmico de torrefação; Degradação térmica; Modelos regressivos

Abstract

This study was carried out with the purpose of estimating by simple linear regression analysis some properties of wood residues of urban origin after a procedure of sampling and thermal treatment of roasting. Different compositions of solid wood and reconstituted panels were formulated from an urban waste recycling plant located in the city of Piracicaba, SP. Analyzes were carried out to determine the moisture, bulk density, extractive content, lignin content, holocellulose content, immediate analysis, determination of useful calorific value and calorific value and energy density. The values obtained were analyzed by means of regression analysis in order to obtain equations with effective indices capable of predicting the characteristics of these types of wood residues. The results suggest that the equations obtained were effective in estimating the properties analyzed, however, future studies are recommended to confirm these regression equations.

Keywords: Biomass energy; Heat roasting process; Thermal degradation; Regressive models

5.1 Introdução

No Brasil, a geração de resíduos de madeira nos centros urbanos está associada, principalmente, ao descarte de materiais utilizados na construção civil, obras de reformas e demolição, poda urbana, embalagens para transporte, e de utensílios e móveis que ao longo do tempo foram substituídos (ANDRADE, 2015).

Dados oficiais do Ministério do Meio Ambiente (MMA) estimam que sejam gerados anualmente no país 2,79 milhões de toneladas destes resíduos, sendo os destinos mais comuns a disposição em terrenos baldios, queima a céu aberto, disposição em aterro sanitário e, em alguns casos, o beneficiamento em cooperativas e estações de reciclagem (MMA, 2009a; 2009b).

A desvalorização desse tipo de material ocorre, possivelmente, devido à escassez de políticas públicas e de iniciativas visando a promoção do reuso sustentável, tornando-o um problema ambiental ao invés de gerador de receitas e de desenvolvimento social. Atrelado a isso, existe a ausência de estudos de caracterização tecnológica visando a geração de energia, por exemplo.

Sob a ótica da utilização energética, torna-se relevante o conhecimento de atributos que direcione esses materiais para tal finalidade, como a umidade, densidade, poder calorífico, composição química, dentre outros.

Além destes, a utilização de pré-tratamentos térmicos que visem aumentar a valor energético do combustível, e ao mesmo tempo uniformizar suas características físico-químicas são considerados promissores. A torrefação é um destes pré-tratamentos que alteram as propriedades tecnológicas do material resultando em um produto intermediário entre a madeira e o carvão vegetal (PIERRE et al., 2011). Esse novo produto, conhecido como madeira torrada, pode ser obtido em temperaturas entre 200 a 300 °C, e apresenta diversas vantagens em relação ao material original (diminuição da higroscopicidade, da resistência a moagem, aumento da resistência à degradação biológica, etc.) (BRITO, 1993a; PINCELLI; BRITO; CORRENTE, 2002; BERGMAN; KIEL, 2005; ALMEIDA; BRITO; PERRÉ, 2009).

Todavia, a determinação dessas características, seja no material *in natura* seja no torrado, constitui atividades dispendiosas em função de necessidades como amostragem criteriosa, condução de análises e ensaios, além de amplo conhecimento sobre tais materiais.

Uma forma de obtenção rápida e indireta de dados relativos as propriedades da madeira é a aplicação de ferramentas matemáticas estatísticas, conforme observadas em trabalhos de PROTÁSIO et al., (2011); TODOROVIC et al., (2012); MARCONDES et al., (2013); ALMEIDA et al., (2014); CAVALHEIRO et al., (2016); CHRISTOFORO et al., (2016).

Na área de energia da biomassa, a modelagem pelo uso de regressões lineares simples ou múltiplas pode ser fundamental para analisar a relação entre variáveis e realizar previsões

de interesse técnico-científicas, como poder calorífico superior, componentes químicos elementares, teor de cinzas e outros (PRÓTÁSIO et al., 2012).

Outra vantagem proporcionada pelo uso de inferências estatísticas é a possibilidade de diminuição de custos e tempo das análises em avaliações preliminares de vários tipos de biomassa, como na seleção de resíduos lignocelulósicos para a produção de calor, vapor ou eletricidade em caldeiras ou gaseificadores (PRÓTÁSIO et al., 2011).

Embora os benefícios do uso destas ferramentas sejam amplamente relatados na literatura, são escassos estudos da mesma natureza que abordem resíduos de madeira de origem urbana. Supõe-se que modelos estatísticos de regressão possam fornecer parâmetros que auxiliem na compreensão destas propriedades e na promoção do uso destes materiais.

Por esse motivo, este trabalho teve por objetivos estimar as características tecnológicas de resíduos de madeira de origem urbana com vistas ao seu aproveitamento energético.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Material

Foram analisadas composições de resíduos de madeira de origem urbana coletados em uma empresa do ramo de reciclagem de entulhos da construção civil que está instalada no município de Piracicaba – SP. O procedimento de amostragem obedeceu as descrições da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (2004) NBR 10.007 (ABNT, 2004), onde no momento da coleta, os diferentes resíduos encontrados na pilha de amostragem foram divididos em resíduos de madeira maciça e resíduos de painéis reconstituídos. A categoria de painéis reconstituídos é formada por uma amostra composta por 23% de painel compensado, 4% de painel aglomerado, 10% de painel MDF, 3% de painel OSB e 4% de painel chapa dura, sendo a porcentagem associada a cada tipo de painel equivalente a realidade da amostra coletada em campo. De forma antecedente ao estabelecimento dos tratamentos, os cavacos de madeira maciça e de painéis, foram, de forma separada, submetidos a um processo de homogeneização com auxílio de uma betoneira, por 10 minutos. Após esse tempo, os resíduos contidos no interior da betoneira passaram por um processo de quarteamento para retirada das amostras que seriam submetidas ao ensaio da torrefação e posterior caracterização física, química e energética.

Cada tratamento foi analisado na sua forma *in natura* e após tratamento térmico de torrefação, conforme na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Tratamentos analisados

Tratamento	Composição	PM	Condição 1	Condição 2
T1	100% madeira maciça	1:0	<i>In natura</i>	Torrado
T2	75% madeira maciça + 25% painéis	3:1	<i>In natura</i>	Torrado
T3	50% madeira maciça + 50% painéis	1:1	<i>In natura</i>	Torrado
T4	25% madeira maciça + 75% painéis	1:3	<i>In natura</i>	Torrado
T5	100% painéis	0:1	<i>In natura</i>	Torrado

Em que: PM = Proporção de madeira maciça e de painéis

5.2.2 Processo térmico de torrefação

Amostras de cavacos (condição *in natura*) foram inicialmente colocadas em três contêineres metálicos de dimensões 20 cm comprimento x 8 cm largura x 3 cm altura, e em seguida levadas a estufa elétrica regulada a 103 ± 2 °C até massa constante. Em seguida os três contêineres preenchidos com cavacos absolutamente secos foram inseridos no interior de uma câmara de torrefação hermeticamente fechada, dotada de porta de acesso e orifícios destinados à inserção de termopares para controle da temperatura, evacuação de gases do processo e para a introdução de nitrogênio no interior, para formação de uma atmosfera inerte. A injeção do nitrogênio teve início à 180 °C, conforme estudo de Rodrigues (2009), e se manteve até o final da torrefação. O fluxo de nitrogênio foi 30 ml.min⁻¹, conforme descrito por Santos (2012). A temperatura inicial do processo foi de ± 30 °C, e temperatura final de 280 °C (± 5 °C), mantida nesta por 60 minutos e taxa de aquecimento de 1,5 °C.min⁻¹. A temperatura final de 280 °C foi fundamentada nos resultados obtidos por Arias et al. (2008); Rodrigues (2009); Dhungana; Dutta; Basu, (2012); Santos (2012). O patamar final de 60 minutos e a respectiva taxa de aquecimento foram definidos com base em ensaio piloto.

5.2.3 Análises realizadas

A seguir as propriedades analisadas e as respectivas normas e procedimentos utilizados.

- Densidade à granel - NBR 6922 (ABNT, 1981).
- Umidade – A umidade na base úmida foi obtida a partir da diferença de massa entre o material úmido e após a secagem a 103 ± 2 °C - até massa constante, por meio da eq. (1).

$$U = \frac{M_u - M_s}{M_u} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

U = umidade (%)

Mu = massa úmida (g)

Ms = massa seca (g)

- Teor de extrativos totais - TAPPI T-264 (1993).
- Teor de lignina total - TAPPI 222 05-74 (1974).
- Teor de holocelulose foi obtido por diferença (100% subtraído o somatório dos teores de extrativos totais e lignina).
- Análise imediata para determinação dos teores de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo - NBR 8112 (ABNT, 1986).
- Poder calorífico superior - NBR 8633 (ABNT, 1984).
- Poder calorífico inferior (PCI) e Poder calorífico útil (PCU) foram determinados segundo (BRITO, 1993b), por meio das eq. (2) e (3):

$$PCI = PCS - 600 \frac{9H}{100} \quad (2)$$

$$PCU = PCI \frac{100 - U}{100} - 6U \quad (3)$$

Em que:

PCI = poder calorífico inferior (kcal.kg⁻¹)

PCS = poder calorífico superior (kcal.kg⁻¹)

PCU = poder calorífico útil (kcal.kg⁻¹)

H = teor de hidrogênio teórico (%)

U = umidade do material (%)

- A densidade energética foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior pelos respectivos valores de densidade a granel.
- Rendimento gravimétrico da torrefação: Os rendimentos foram obtidos através do cálculo da relação entre a quantidade de material após o tratamento e a quantidade do material antes do tratamento (seca), conforme eq. (4):

$$\text{Rendimento Torrefação (\%)} = \frac{\text{Massa Torrificada (g)}}{\text{Massa original (g)}} \times 100 \quad (4)$$

Foram realizadas cinco repetições para cada análise sendo possível a determinação dos respectivos erros padrões das médias.

5.2.4 Análise dos dados

Para a definição dos melhores modelos na regressão linear múltipla, realizou-se inicialmente uma análise por meio da matriz de correlação entre as variáveis (cruzamento de todas as características) de forma a verificar se as mesmas eram possíveis de serem relacionadas. Assim, foram selecionados os melhores valores de correlação (>70%) e significância entre as variáveis independentes adotando como variável dependente a proporção dos resíduos definida pelos diferentes tratamentos, proporcionando a precisão para a estimativa das propriedades energéticas. Na análise da regressão linear simples e múltipla, o ajuste das funções foi feito pelo método dos mínimos quadrados ordinários.

Na análise dos modelos, foram utilizados os critérios de Soares; Neto; Souza, (2006): coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (S_{yx}), e a significância dos coeficientes de regressão.

O coeficiente de determinação (R^2) determina o grau de ajustamento de uma equação ao conjunto de dados utilizados, ou seja, expressa a quantidade da variação total em torno da média que é explicada pela regressão. O erro padrão da estimativa (S_{yx}) é uma medida de dispersão entre os valores observados e estimados pela equação, ou seja, indica o erro médio associado ao uso da equação testada, sendo desejável aquela que tenha o menor valor.

Por fim, a significância dos coeficientes de regressão através do teste F da análise de variância (ANAVA) avalia o ajuste dos coeficientes de regressão à base dos dados nos modelos lineares e não lineares. As análises foram realizadas com auxílio do software Minitab16.1[®].

5.3 Resultados e Discussão

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores médios do rendimento da torrefação para os tratamentos avaliados e seus respectivos valores de erro padrão da média.

Tabela 5.2 - Valores médios para o rendimento da torrefação

Tratamento	Rendimento torrefação (%)	EP
1	75,78	0,79
2	75,55	2,23
3	72,21	3,58
4	66,49	1,23
5	56,96	1,28

Em que: Tratamento 1 = Proporção de 1/0 = (100% maciça + 0% painéis); Tratamento T2 = Proporção de 3/1 = (75% maciça + 25% painéis); Tratamento T3 = Proporção de 1/1 = (50% maciça + 50% painéis); Tratamento T4 = Proporção de 1/3 = (25% maciça + 75% painéis); Tratamento T5 = Proporção de 0/1 = (0% maciça + 100% painéis); EP = erro padrão da média.

Na Tabela 5.3 são apresentados os valores médios de densidade a granel, umidade, teor de extrativos totais, lignina, holocelulose, materiais voláteis, carbono fixo, cinzas, poder calorífico superior, inferior e útil, e densidade energética, para as condições *in natura* e torrados, e seus respectivos erros padrão da média.

1 Tabela 5.3 - Valores médios para as propriedades analisadas

Tratamento	C	DG	U	TE	TL	TH	TMV	TCZ	TCF	PCS	PCI	PCU	DE
		kg.m ³ ⁻¹				%					kJ kg ⁻¹		kJ m ³ ⁻¹
1	1 <i>in natura</i>	233,56	7,66	21,37	31,46	47,17	81,82	1,17	17,01	19182,2	17909,5	16344,4	4480348,59
	EP	1,06	0,06	1,33	0,53	1,38	0,32	0,06	0,28	406,8	406,8	369,2	100018,8
	2 torrado	184,48	8,74	10,8	55,22	33,97	66,86	1,1	32,04	22453,8	21181,0	19111,9	4142365,43
	EP	1,03	0,03	0,77	0,27	0,60	0,13	0,05	0,12	62,1	62,1	57,4	24899,8
2	1 <i>in natura</i>	221,83	7,39	14,63	31	54,37	85,28	1,12	13,6	19554,9	18282,1	16745,5	4337682,56
	EP	1,97	0,05	0,18	0,48	0,32	1,72	0,08	1,70	26,0	26,0	22,3	35910,0
	2 torrado	158,08	8,66	9,437	55,72	34,85	65,27	1,29	33,44	22444,6	21171,8	19119,4	3548070,15
	EP	0,31	0,07	0,12	0,36	0,25	0,24	0,03	0,23	32,9	32,9	41,3	6098,0
3	1 <i>in natura</i>	201,37	7,37	14,86	30,06	55,08	90,44	1,97	7,59	19100,2	17827,4	16327,7	3846118,80
	EP	2,67	0,03	0,09	0,63	0,57	1,25	0,03	1,28	26,9	26,9	27,1	50464,2
	2 torrado	146,91	8,48	9,401	61,53	29,07	62,15	1,4	36,45	22705,0	21432,2	19402,5	3335662,48
	EP	0,84	0,05	0,27	0,32	0,40	0,48	0,10	0,40	128,2	128,2	114,5	27343,5
4	1 <i>in natura</i>	189,41	6,68	14	28,08	57,92	89,18	1,93	8,894	19153,8	17881,0	16519,4	3627426,41
	EP	5,00	0,08	0,28	0,36	0,50	0,35	0,04	0,36	29,8	29,8	18,6	91963,4
	2 torrado	128,62	8,62	9,653	72,11	18,23	56,25	2,13	41,62	23493,0	22220,2	20089,1	3021513,49
	EP	0,69	0,02	0,31	0,22	0,48	0,61	0,05	0,64	77,3	77,3	71,3	15879,3
5	1 <i>in natura</i>	187,24	6,55	14,43	27,26	58,31	89,21	2,18	8,612	18708,3	17435,5	16127,6	3502978,28
	EP	1,07	0,08	0,13	0,54	0,48	0,74	0,07	0,78	24,3	24,3	21,5	23426,6
	2 torrado	109,72	7,73	9,231	84,28	6,484	46,38	3,01	50,61	23841,3	22568,5	20629,2	2615842,54
	EP	0,90	0,07	0,35	0,29	0,29	0,08	0,05	0,12	120,3	120,3	104,2	27475,2

2 Em que: Tratamento 1 = Proporção de 1/0 = (100% maciça); Tratamento T2 = Proporção de 3/1 = (75% maciça + 25% painéis); Tratamento T3 = Proporção de 1/1 = (50%
3 maciça + 50% painéis); Tratamento T4 = Proporção de 1/3 = (25% maciça + 75% painéis); Tratamento T5 = Proporção de 0/1 = (100% painéis). C = Condição, sendo 1 = *in*
4 *natura* e 2 = painéis; EP = Erro padrão da média; DG = densidade granel; TE = teor de extrativos totais; TL = teor de lignina; TH = teor de holocelulose; TMV= teor de
5 materiais voláteis; TCZ= teor de cinzas; TCF = teor de carbono fixo; PCS = poder calorífico superior; U = umidade; PCU = poder calorífico útil; DE = densidade energética.

5.3.1 Correlações entre as propriedades analisadas

Observa-se na Tabela 5.4 que a maioria das correlações foram significativas ($>0,7$) para o nível de significância adotado que é de 99% de probabilidade.

Tabela 5.4 - Matriz de correlação para os resíduos *in natura*

Variável	PM	DG	TE	TL	TH	TMV	TCZ	TCF	PCS	U	PCU
PM	1										
DG	0,93*	1									
TE	0,68*	0,68*	1								
TL	0,83*	0,74*	0,46*	1							
TH	-0,85*	-0,82*	-0,92*	-0,78*	1						
TMV	-0,70*	-0,74*	-0,64*	-0,55*	0,70*	1					
TCZ	-0,88*	-0,89*	-0,50*	-0,67*	0,65*	0,73*	1				
TCF	0,73*	0,78*	0,65*	0,58*	-0,72*	-1,00*	-0,78*	1			
PCS	0,42**	0,36**	0,07	0,39**	-0,23**	-0,19**	-0,44*	0,23**	1		
U	0,91*	0,80*	0,61*	0,82	-0,80*	-0,48*	-0,70*	0,51	0,41*	1	
PCU	0,24**	0,20**	-0,07	0,23**	-0,06	-0,10	-0,31**	0,12	0,98*	0,21**	1
DE	0,92*	0,97*	0,62*	0,75	-0,78*	-0,71*	-0,89*	0,75*	0,57*	0,81*	0,42*

Em que: PM = proporção de madeira maciça; DG = densidade à granel (kg.m^{-3}); TE = teor de extrativos totais (%); TL = teor de lignina (%); TH = teor de holocelulose (%); TMV = teor de materiais voláteis (%); TCZ = teor de cinzas (%); TCF = teor de carbono fixo (%); PCS = poder calorífico superior (kJ kg^{-1}); U = umidade base úmida (%); PCU = poder calorífico útil (kJ kg^{-1}); DE = densidade energética (kJ m^{-3}). (* e **) = indica a significância a 99% e 95% de probabilidade, respectivamente.

Já para os materiais torrados (Tabela 5.5), todas as correlações apresentaram significativas. Para ambos os casos (material *in natura* e torrado) as regressões foram estabelecidas somente para relações passíveis de representação. Essa observação é feita com base no fato de que, uma alta correlação necessariamente não quer dizer que algumas predições sejam possíveis. O objetivo deste estudo foi o de estudar propriedades que independem de condições diversas, ou seja, de propriedades que envolvem os materiais em questão e não sazonalidades, aspectos físicos, e etc.

Tabela 5.5 - Matriz de correlação para os resíduos torrados

Variável	PM	DG	TE	TL	TH	TMV	TCZ	TCF	PCS	U	PCU	DE
PM	1											
DG	0,99*	1										
TE	0,41*	0,42*	1									
TL	-0,95*	-0,93*	-0,31**	1								
TH	0,94*	0,91*	0,22**	-1,00*	1							
TMV	0,94*	0,93*	0,31**	-0,99*	0,99*	1						
TCZ	-0,92*	-0,91*	-0,35**	0,97*	-0,96*	-0,98*	1					
TCF	-0,95*	-0,93*	-0,31**	0,99*	-0,99*	-1,00*	0,97*	1				
PCS	-0,90*	-0,87*	-0,25**	0,94*	-0,94*	-0,92*	0,93*	0,91*	1			
U	0,76*	0,76*	0,32**	-0,83*	0,82*	0,86*	-0,83*	-0,86*	-0,69*	1		
PCU	-0,91*	-0,89*	-0,27**	0,96*	-0,96*	-0,95*	0,95*	0,94*	0,99*	-0,76*	1	
DE	0,98*	1,00*	0,44*	-0,91*	0,89*	0,92*	-0,89*	-0,92*	-0,84*	0,75*	-0,86*	1
RT	0,92*	0,90*	0,25**	-0,98*	0,98*	0,98*	-0,96*	-0,98*	-0,92*	0,83*	-0,94*	0,88*

Em que: PM = proporção de madeira maciça; DG = densidade à granel (kg.m^{-3}); TE = teor de extrativos totais (%); TL = teor de lignina; TH = teor de holocelulose (%); TMV = teor de materiais voláteis (%); TCZ = teor de cinzas (%); TCF = teor de carbono fixo (%); PCS = poder calorífico superior (kJ kg^{-1}); U = umidade base úmida (%); PCU = poder calorífico útil (kJ kg^{-1}); DE = densidade energética (kJ.m^{-3}) (* e **) = indica a significância a 99% e 95% de probabilidade, respectivamente.

5.3.2 Estimativas das propriedades de resíduos *in natura*

Os índices de ajustes encontrados para os parâmetros estatísticos são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Parâmetros estatísticos das equações para os resíduos *in natura*

(Y)	(X)	R ²	R ² aj	EP (±)	Valor p (B0)	Valor p (B1)	Equação
DG	PM	0,852	0,845	0,007	2,1E-27	1,3E-10	$\hat{Y} = 0,1818 + 0,0491x_i$
U	PM	0,835	0,828	0,191	9,8E-32	1,8E-10	$\hat{Y} = 6,54 + 1,16x_i$
TCZ	PM	0,766	0,756	0,230	2,6E-19	1,0E-08	$\hat{Y} = 2,24 - 1,13x_i$
TCF	PM	0,538	0,518	2,935	7,3E-07	3,0E-05	$\hat{Y} = 6,84 + 8,59x_i$
TMV	PM	0,483	0,461	2,847	4,7E-31	1,2E-04	$\hat{Y} = 0,91 - 7,46x_i$
DE	PM	0,848	0,842	39,687	1,1E-26	6,8E-11	$\hat{Y} = 818,26 + 254,60x_i$
TL	PM	0,684	0,671	1,133	3,0E-28	3,4E-07	$\hat{Y} = 27,31 + 4,52x_i$
TH	PM	0,729	0,717	2,323	8,0E-01	1,3E+00	$\hat{Y} = 59,73 - 10,33x_i$

Em que: PM = proporção de madeira maciça; DG = densidade à granel (kg m^{-3}); U = umidade base úmida (%); TCZ = teor de cinzas (%); TCF = teor de carbono fixo (%); TMV = teor de materiais voláteis (%); DE = densidade energética (kJ m^{-3}); TL = teor de lignina (%); TH = teor de holocelulose (%); EP = erro padrão da estimativa.

Observa-se bons índices para o coeficiente de determinação (Tabela 5.6), sendo evidente que os mesmos proporcionaram boa precisão nos ajustes, apresentando baixo erro padrão da estimativa, além de p valores tanto de B0 e B1 significativos para o coeficiente de

regressão. Somente as variáveis teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis e teor de lignina apresentaram valores de R^2 inferiores a 0,70, valor considerado mínimo para seleção de modelos de estimativas por Pimentel Gomes (2012). É preciso considerar que, os resíduos de madeira de origem urbana apresentam diversas composições de materiais como madeira maciça, materiais reconstituídos (painéis aglomerados, compensados, OSB) o que pode, possivelmente, ser o responsável por tal resultado. Além deste, observa-se alto valor de erro padrão para a variável densidade energética. Sendo ela um valor obtido a partir de outros valores (densidade à granel e poder calorífico) é um resultado tecnicamente aceitável em função das respectivas variações que se interferem diretamente na variável final (densidade energética).

Neste contexto, as equações apresentam-se adequadas adotando a proporção de resíduos (de madeira maciça e de painéis) como variável independente na estimativa das propriedades energéticas.

5.3.3 Estimativas das propriedades de resíduos torrados

De forma semelhante aos resultados obtidos para os resíduos *in natura*, pode-se observar que as equações testadas para os materiais torrados (Tabela 5.7) apresentaram p valores significativos e com baixos valores para os erros padrões das estimativas, indicando pouca dispersão entre os valores observados e os estimados.

Tabela 5.7 - Parâmetros estatísticos das equações para os resíduos torrados

(Y)	(X)	R^2	R^2 aj	EP	Valor p (B0)	Valor p (B1)	Valor p (B2)	Equação
DG	PM	0,98	0,98	0,003	4,4E-31	5,5E-22	-	$\hat{Y} = 0,109 + 0,071x_i$
TCZ	PM	0,85	0,84	0,294	7,9E-19	8,2E-11	-	$\hat{Y} = 2,72 - 1,86x_i$
TL	PM	0,90	0,90	3,603	1,6E-27	3,9E-13	-	$\hat{Y} = 80,67 - 29,80x_i$
TMV	PM	0,89	0,89	2,557	4,8E-26	1,3E-12	-	$\hat{Y} = 49,36 + 19,98x_i$
TCF	PM	0,89	0,89	2,311	9,5E-27	1,2E-12	-	$\hat{Y} = 47,89 - 18,12x_i$
PCS	PM	0,81	0,80	65,818	5,9E-41	1,1E-09	-	$\hat{Y} = 5676,12 - 365,28x_i$
DE	PM	0,97	0,97	22,540	1,2E-29	7,4E-19	-	$\hat{Y} = 625 + 341,98x_i$
RG	PM	0,84	0,83	2,985	1,9E-26	1,1E-10	-	$\hat{Y} = 60,06 + 18,68x_i$
U	PM	0,58	0,56	0,258	8,3E-31	9,9E-06	-	$\hat{Y} = 8,03 + 0,821x_i$
PCU	PM	0,84	0,83	62,464	5,4E-40	1,7E-10	-	$\hat{Y} = 4889,43 - 382,59x_i$
PCU	PM e U	0,85	0,83	61,748	4,6E-12	3,4E-06	2,28E-01	$\hat{Y} = 5386,60 - 331,77x_{i1} - 61,87x_{i2}$

Em que: DG = densidade à granel (kg. m^{-3}); TCZ = teor de cinzas (%); TL = teor de lignina (%); TMV = teor de materiais voláteis (%); TCF = teor de carbono fixo (%); PCS = poder calorífico superior (kJ.kg^{-1}); DE = densidade energética (kJ.m^{-3}); RG = rendimento gravimétrico (%); U = umidade base úmida (%); PCU = poder calorífico útil (kJ.kg^{-1}); PM = proporção de madeira maciça; EP = erro padrão da estimativa.

Os valores de R^2 apresentaram superiores quando comparados aos resíduos *in natura*. O processo de torrefação tem como base a melhoria nas propriedades dos resíduos por meio de incrementos em alguns parâmetros e homogeneização do material, agregando valores técnicos e econômicos, que na sua forma *in natura*, não seriam satisfatórios.

Tentou-se ainda, obter melhores índices de regressão para o poder calorífico útil (PCU) incluindo a variável umidade à variável proporção de resíduos, todavia não houve melhora significativa do valor de R^2 (0,84 para 0,85) assim como, não houve diminuição do erro padrão. Dessa forma, somente a variável proporção dos resíduos foi eficiente na estimativa do PCU.

5.4 Conclusões

O uso de equações de regressão na estimativa das propriedades energéticas de resíduos de madeira de origem urbana pode ser aplicado, com base nos índices de ajuste obtidos, utilizando-se da regressão linear simples, desde que sejam considerados os mesmos procedimentos de amostragem seguidos nesta pesquisa e respectivas análises.

Referências

- ALMEIDA, D. H. De; SCALIANTE, R. D. M.; CHRISTOFORO, A. L.; DONIZETI, L.; ANTONIO, F.; LAHR, R.; ALVES, A.; CALIL, C. Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. **Floresta**, v. 38, n. 1, p. 203–207, 2014.
- 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**, v. 63, n. 1, p. 80–88, 2009.
- ANDRADE, C. R. A bola da vez: Valorização Energética de Resíduos de Madeira de Origem Urbana. **Revista Opiniões**, n. 38, p. 20 – 21, 2015.
- 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**, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: carvão vegetal - ensaios físicos -determinação da massa específica do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1981. 2p. . 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p. . 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986. 5p., 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: 2004**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.

BERGMAN, P. C. a.; KIEL, J. H. a. Torrefaction for biomass upgrading. **Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France**, n. October, p. 17–21, 2005. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Torrefaction+for+biomass+upgrading#0>>.

BRITO, J. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **Piracicaba: IPEF**, 1993a. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr181.pdf>>.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidade energéticas. In CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7. p. 280–282, 1993b.

CAVALHEIRO, R. S.; ALMEIDA, D. H.; ALMEIDA, T. H. De; CHRISTOFORO, A. L.; ANTONIO, F.; LAHR, R.; CARLOS, S. **Density as Estimator of Shrinkage for Some Brazilian Wood Species**. v. 6, n. 3, p. 107–112, 2016.

CHRISTOFORO, A. L.; ALMEIDA, T. H. De; ALMEIDA, D. H. De; CÉSAR, J.; PANZERA, T. H.; ANTONIO, F.; LAHR, R. **Shrinkage for Some Wood Species Estimated by Density**. v. 6, n. 2, p. 23–27, 2016. Disponível em: <<file:///C:/Users/OWEN/Downloads/10.5923.j.ijme.20160602.01.pdf>>.

DHUNGANA, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of non-lignocellulose biomass waste. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 90, n. 1, p. 186–195, 2012.

MARCONDES, E.; RIBEIRO, M. A.; STANGERLIN, D. M.; SOUZA, A. P. De. Resistência natural da madeira de duas espécies amazônicas em ensaios de deterioração de campo. **Scientia plena**, v. 9, n. 6, p. 1–9, 2013.

MMA. **Levantamento sobre a geração de resíduos provenientes da atividade madeireira e proposição de diretrizes para políticas, normas e condutas técnicas para promover o seu uso adequado**. Curitiba, 2009a.

MMA. **Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para Fins Energéticos**. Curitiba, 2009b.

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**, v. 6, n. 2, p. 1204–1218, 2011.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 15º ed. Editora Fealq, 2012. 451p.

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

PROTÁSIO, T. D. P.; BUFALINO, L.; HENRIQUE, G.; TONOLI, D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**. p. 113–122, 2011.

PRÓTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, M. G.; TONOLI, G. H. D.; TRUGILHO, P. F. Modelagem Do Poder Calorífico Superior Em Função Dos Componentes Elementares E Minerais. **XIII Ebramem**, n. June 2016, 2012. Disponível em:
<http://www.researchgate.net/publication/235469567_MODELAGEM_DO_PODER_CALORIFICO_SUPERIOR_EM_FUNO_DOS_COMPONENTES_ELEMENTARES_E_MINERAIS_MODELING_OF_THE_HIGHER_HEATING_VALUE_IN_FUNCTION_OF_ELEMENTAL_AND_MINERAL_COMPONENTS>.

RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. Universidade de Brasília, 2009.

SANTOS, J. R. S. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. Juliana Rodrigues Siviero dos Santos Piracicaba. 2012.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. de P.; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. [s.l: s.n.]

TAPPI 222 05-74. **Tappi: Acid insoluble lignin in wood and pulp. rapport**, 1974.
TAPPI T264. TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY.
Tappi: Preparation of wood for chemical analysis. Standart Methods. Atlanta: n.p. 1993

TODOROVIC, N.; POPOVIC, Z.; MILIC, G.; POPADIC, R. Estimation of heat-treated beechwood properties by color change. **BioResources**, v. 7, n. 1, p. 799–815, 2012.

6 CONCLUSÕES GERAIS

No capítulo 2, os contaminantes encontrados não foram considerados como sendo fatores de impedimento ao aproveitamento energético destes resíduos.

No capítulo 3 os resultados permitiram concluir que os resíduos de madeira de origem urbana se assemelham em termos tecnológicos a outros tipos de madeira que tradicionalmente são utilizadas para fins energéticos. Foi observado ainda que os resíduos de madeira maciça e de painéis apresentaram propriedades tecnológicas semelhantes entre si.

No Capítulo 4 foi verificado que a torrefação mostrou-se uma técnica eficiente na promoção de melhorias nas características físicas, químicas e energéticas dos resíduos avaliados.

No capítulo 5, foi demonstrado que o uso de equações de regressão linear simples na estimativa das propriedades energéticas de resíduos de madeira de origem urbana pode ser aplicado, desde que sejam considerados os mesmos procedimentos de amostragem seguidos nesta pesquisa e as respectivas análises.

Os resultados apresentados demonstram a aptidão da madeira contida em resíduos sólidos urbanos para ser utilizada com fins energéticos.