

III-431 - MÉTODO PARA DISPONIBILIZAÇÃO DO CAVACO DE RESÍDUOS DE PLANTIOS FLORESTAIS E DE PODA URBANA, COM MONITORAMENTO DA SECAGEM EM PÁTIO ABERTO

Adelino Carlos Maccarini⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela UPF, Universidade de Passo Fundo - RS. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - SP. Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Câmpus Pato Branco.

Marcelo Risso Errera

Engenheiro Mecânico pela UFES, Universidade Federal do Espírito Santo. Mestre em Energia e Ciências Térmicas pela FEM/UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Doutor em Engenharia Mecânica e Ciências dos Materiais pela Universidade de Duke, EUA. Professor da UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Marcelo Rodrigues Bessa

Engenheiro Civil pela UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. Diploma e MSc in Hydraulic Engineering, IHE, Delft, The Netherlands. PhD in Systems Design Engineering, University of Waterloo, Canada. Pós-Doutorado no DENSIS, UNICAMP, Campinas-SP. Professor do Departamento de Hidráulica e Saneamento, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental e do Curso de Especialização em Eficiência Energética e Energias Renováveis da UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Dimas Agostinho da Silva

Engenheiro Florestal pela UFV, Universidade Federal de Viçosa. Mestre em Ciências Florestais pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Doutor em Engenharia Florestal pela UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Professor Associado da UFPR, Setor de Ciências Agrárias, Curso de Engenharia Florestal e Coordenador do LEB, Laboratório de Energia de Biomassa.

Endereço⁽¹⁾: Via do Conhecimento, km 01 CEP – 85.503-390 – Pato Branco - PR - Brasil - Tel: (46) 3220-2511- E-mail: maccarini@utfpr.edu.br.

RESUMO

A madeira é um material higroscópico que mantém relações dinâmicas com a umidade do ambiente. Considerando essa realidade, foram desenvolvidas técnicas para encontrar formas de armazenamento e disponibilização mais adequados para a secagem da biomassa residual de plantios florestais e da poda urbana, *in natura* ou triturada, levando em consideração que a maior parte das indústrias enfrentam essas dificuldades antes da utilização em fornalhas ou geradores de vapor.

Os resultados levaram à determinação das características que foram utilizadas na avaliação das taxas de secagem de cavaco dessa biomassa residual depositado em leiras e monitoradas ao longo de dois anos. Percebeu-se assim que do lado interno das leiras, o cavaco estava com 2,39 vezes menos umidade em base seca que o cavaco localizado na parte externa. A partir dos experimentos, percebeu-se que, em situações de chuva, apesar do cavaco ter massa porosa, por algum motivo a água escoava quase que totalmente pela região superficial da leira de cavaco, com pouca percolação em seu interior.

Este trabalho, enfim, foi realizado com o intuito de explorar este fenômeno e entender por que ocorre esta interface onde demonstrou diferença abrupta de umidade, e dali, propor formas de armazenamento do cavaco de biomassa em ambientes abertos, sujeitos às chuvas e intempéries, mostrando que pode haver um critério e controle mais adequados de retirada de cavaco mais seco localizado nas regiões internas da leira.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa, Biomassa Residual, Umidade da Biomassa, Disposição de Biomassa Residual, Leiras, Cavaco, Resíduos de Poda.

INTRODUÇÃO

Em função da umidade relativa do ar e da umidade da biomassa, a madeira pode ceder ou reter água ao meio. De acordo com Mellado (2007), o processo de secagem está diretamente envolvido com a movimentação interna de sua umidade. Existem três tipos de água na madeira: a água livre ou de capilaridade, a água de adesão ou de impregnação e a água de constituição [e.g., Aguilar, Song e Shifley (2011)]. A maior parte da água livre, de acordo com Chen et al. (2012), é perdida após o abatimento da árvore por evaporação. Em seguida, mais lentamente, a água de adesão será eliminada até que a madeira atinja o equilíbrio entre a sua umidade e as condições externas de umidade relativa do ar, temperatura e convecção do ar. Este ponto, em que a madeira não perde nem retém água do ambiente, é denominado umidade de equilíbrio da madeira.

A água livre ou de capilaridade, de acordo com Fowler et al. (2009), é a que ocupa as cavidades das células e espaços intercelulares, incluindo também vasos e canais resiníferos, retida por fracas ligações capilares. O movimento que ali ocorre é o da transferência de umidade acima do ponto de saturação das fibras, PSF, sob a ação de forças capilares, baseado na lei de Hagen-Poiseuille, onde, conforme Dercan et al. (2012), move-se no estado líquido através das cavidades celulares presentes na madeira do interior para a superfície. O PSF refere-se a um ponto de umidade que normalmente varia de 25% a 35% e a água se aloja nas paredes das fibras.

Segundo Santos, Jankowsky e Andrade (2003), o deslocamento da umidade ocorre geralmente de zonas de alta concentração de água para as de baixa concentração, tanto no sentido longitudinal, quanto transversal das fibras, sempre buscando o menor caminho para sair e variando com a existência de gradientes de umidade e condições externas de temperatura, umidade relativa e circulação do ar. Como a umidade externa geralmente é menor que a interna, isto proporciona que se desloque da parte interior do lenho para a parte exterior, criando uma atração capilar da água livre nas cavidades celulares. É o processo de secagem, propriamente dito que é o balanço dinâmico entre a transferência de calor do ar para a superfície da madeira e a transferência de umidade da superfície da madeira para a corrente de ar.

Para Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2008), a secagem da madeira é afetada por fatores internos, como espécie da planta, componentes anatômicos da madeira, proporção de cerne e alburno, densidade, permeabilidade, umidade inicial, tamanho de peças ou cavacos. Quanto aos fatores externos, são relacionados ao ambiente de secagem, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos predominantes e de circulação do ar, precipitações, localização do pátio de secagem, superfície exposta, modo de empilhamento da madeira, distância entre o solo e a madeira, inclinação do terreno, presença de vegetação ou barreiras e drenagem do local. Segundo Mellado, (2007) a movimentação da umidade longitudinal é de 10 a 15 vezes mais rápida do que a transversal. Sánchez (2010) indica outros fatores a serem considerados, que interferem na secagem e no poder calorífico, como por exemplo, a estrutura anatômica, composição química e higroscopia.

Klitzke (2007) afirma que, de acordo com a temperatura, a secagem pode ser realizada das seguintes formas: secagem natural ou ao ar livre que ocorre à temperatura ambiente; secagem a baixas temperaturas em câmaras com variação de temperatura entre 30 a 50 °C; secagem convencional, que ocorre na faixa de 50 a 100 °C e; secagem a altas temperaturas, que ocorre de 100 a 180 °C.

De modo geral, a importância da secagem da biomassa resume-se a alguns pontos, citados por Jäppinen, Korpinene e Ranta (2012), e complementados por Gracia, Velázquez-Martí e Estornellc (2014), como:

- promover a redução do peso, reduzindo os custos de transporte e mão-de-obra com o seu manuseio, laboração, beneficiamento, entre outros;
- a menor umidade da biomassa reflete no aumento do poder calorífico para utilização em fornalhas, com redução do tempo de combustão e de perdas de rendimento gravimétrico, consequentemente, quantidades menores de lenha a ser consumida;
- o teor de umidade interfere na energia consumida pelas máquinas para realizar a laboração como o corte e processamento da madeira.

Complementam Yoshioka et al. (2006), que a umidade também interfere na densidade, onde não está por si só associada à qualidade energética para uso em fornalhas, mas também à quantidade de água livre presente em seu interior que, não precisaria ser transportada desnecessariamente por longas distâncias ou ao longo do percurso.

OBJETIVOS

- desenvolver método mais adequado de disponibilização e armazenagem de biomassa residual de plantios florestais e da poda urbana a partir de monitoramento de secagem em pátio aberto;
- explorar efeitos naturais na percolação de água em meios porosos para reavaliar os procedimentos de disposição do cavaco em leiras exposta às intempéries.

MATERIAIS E MÉTODOS

Por recomendação de Velázquez-Martí e Annevelink (2009), foram desenvolvidas técnicas que determinassem o armazenamento e disponibilização mais adequados para a secagem da biomassa *in natura* ou triturada. Para isto, foi preciso determinar as taxas de secagem das leiras formadas pelos resíduos das diferentes espécies de árvores após o corte e também levantar dados e determinar equações das curvas características da perda de umidade envolvendo cada tipo de resíduo estudado e as variáveis mais significativas que poderiam interferir em sua secagem, como por exemplo, formas de disposição, compactação, temperatura, umidade relativa do ar, condições climáticas e área superficial exposta.

Monitorou-se no intervalo de dois anos a secagem natural de diferentes fontes de biomassa residual, considerando a água livre ou de capilaridade, até atingir a umidade de equilíbrio em condições ambientais. Foi dado maior ênfase aos métodos de secagem natural ou ao ar livre à baixa temperatura, em que consistia em deixar a biomassa em ambiente protegido ou exposto à ação dos fatores climáticos de um determinado local, porque, segundo Kasmioui e Ceulemans (2013), é um método que exige um investimento relativamente baixo, porém longo tempo de secagem. Na prática, foi o mais indicado para secagem da biomassa para esses fins.

Por condições logísticas e operacionais, as amostras foram coletadas dentro do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná - UFPR, em Curitiba. Logo após ao corte dos galhos das árvores, foram pesadas e trituradas, na forma de cavaco, conforme a FIGURA 1 e depositadas em terreno aberto, expostos ao sol, chuva e ventos. A leira tinha formato similar a um cone com base semi elíptica, cujas dimensões médias estão representadas na FIGURA 2.

Para determinar o teor de umidade das amostras foi considerada a umidade em base úmida, isto é, correspondia à relação entre a massa inicial nela contida e a massa após a evaporação de água no intervalo de tempo entre cada medição, como determinado pela NBR 7190/97 pela equação (1), proposta por Batista, Couto e Silva (2014). Após a pesagem com balança eletrônica digital, com prato, precisão de 0,1 grama (g) e faixa de medição de até 1250 g, foram inseridas na estufa a $103 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, até atingir peso constante.

$$\bar{W}_u = (M_u - M_s)/M_u \quad (1)$$

Onde:

- M_u : massa da amostra úmida;
- M_s : massa da amostra seca;
- \bar{W}_u : umidade média em base úmida.

Durante o período de coleta de amostras das leiras, a partir de aproximadamente 30 cm de profundidade, havia uma zona com cavacos mais secos ao toque e coloração mais clara que os cavacos da zona superficial das leiras, conforme a FIGURA 1. Nesta FIGURA ficou evidenciada esta fronteira pela diferença de coloração no cavaco, onde a coloração mais clara ao fundo da escavação, representa o cavaco mais seco.



Figura 1: coleta de amostras de cavaco de poda na leira
FONTE: O autor (2013).

Para comprovar e avaliar essa diferença de umidade entre a parte externa e a interna, após a formação da leira de cavaco no pátio, monitorou-se e inspecionou-se semestralmente ao longo desses dois anos, para verificar essa fronteira onde se evidenciava a variação de umidade. Dali foram coletadas amostras realizando escavações com seções transversais quadradas de 35 por 35 cm e profundidade de até 45 cm, FIGURAS 1 e 2. A cada coleta semestral em novas escavações, retirava-se seis amostras, duas dos 10 aos 20 cm de profundidade, duas dos 20 aos 30 cm e duas dos 30 aos 45 cm. Um lote de cada amostra, após pesado, foi deixado na estufa para a secagem e determinar suas taxas de umidade. O lote de amostras coletadas entre os 10 e 30 cm da superfície, onde o cavaco aparentava estar úmido ao toque, totalizou 483,9 g. O lote de amostras coletadas em profundidade superior a 30 cm, onde o cavaco aparentava estar seco ao toque, 917,6 g.

Onde:

- H = 1,6 m;
- L = 4,2 m;
- C = 3,0 m;
- p = 45 cm;
- e = 35 cm.

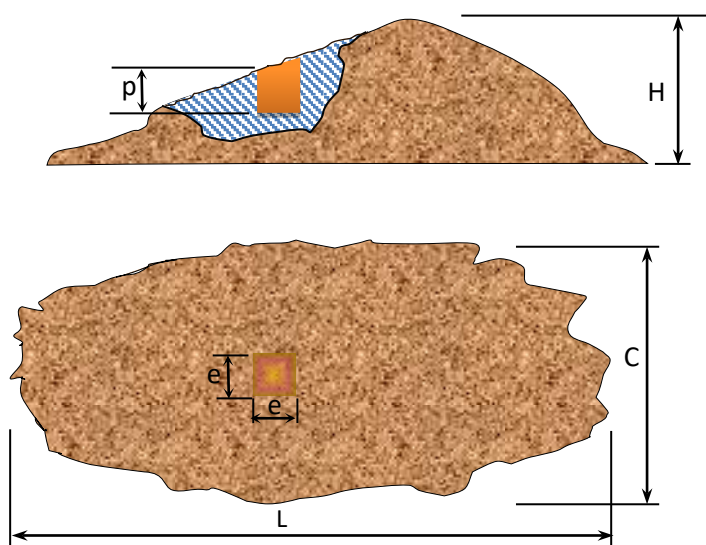


Figura 2: dimensões das cavidades nas leiras para retirada de amostras
FONTE: O autor (2014).

Com o intuito de explorar este fenômeno e entender por que ocorre esta interface com diferença abrupta de umidade, foi realizado o seguinte experimento: utilizou-se um recipiente com formato de paralelepípedo, área superficial retangular de 0,13 m², espessura de 30 cm, foi preenchido com amostras de cavaco com umidade de 13,8% em base seca, deixado com inclinação variável em 10, 20 e 30°. Simulou-se em sua superfície, pelo período de uma hora, chuva de 9,4 mm/h que, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2015), foram os níveis máximos de precipitação registrados na cidade onde estava localizada a leira. Em seguida, foram medidas, a partir da sua superfície nas diferentes inclinações, as profundidades máximas que a água conseguiu percolar no meio poroso, entre os interstícios do cavaco.

RESULTADOS

Resultados das avaliações das taxas de umidade na parte superficial e no interior da leira depositada no pátio

Quanto às amostras que foram coletadas da leira, para que fosse avaliada e comprovada a existência de diferença significativa de taxas de umidade entre a parte superficial e o interior da leira, mesmo estando exposta ao sol, chuva e ventos no pátio da universidade, apresentaram os seguintes resultados após a secagem em estufa:

- aquelas amostras totalizando 483,9 g, que foram coletadas da camada de 10 a 30 cm do lado externo da leira, apresentaram umidade média em base seca de 37,9%;
- as do lado interno, totalizando 917,6 g, retiradas em uma profundidade superior a 35 cm, onde o cavaco apresentava aspecto de menor umidade que do lado externo, apresentaram em média 23,9% de umidade em base seca.

Demonstraram assim que do lado interno da leira, o cavaco estava com 2,39 vezes menos umidade que o cavaco localizado no lado externo, TABELA 1, considerando a umidade de equilíbrio de 13,8% em base úmida. Esta diferença faz com que se reavalie os procedimentos de disposição do cavaco em leiras exposta às intempéries.

Tabela 1: umidade remanescente de amostras de leiras deixadas ao tempo

	Amostras da camada superficial da leira	Amostras a 35cm abaixo da superfície da leira
Massa (g)	483,9	917,6
Umidade base seca (%)	37,9	23,9
Umidade de equilíbrio (%)	13,8	13,8

FONTE: O autor (2015).

Resultados da simulação de chuva em amostras de cavaco

Quanto às amostras que foram submetidas à simulação de chuva de 9,4 mm/h, obteve-se os seguintes resultados:

- a maior parte da água ali jorrada, 96,3%, escorreu pela região superficial da amostra de cavaco;
- os 3,7% remanescentes, ficaram retidos em uma camada média de até 35 mm da superfície;
- abaixo desta camada, o cavaco manteve-se completamente seco, ou seja, não ocorreu contato da água do experimento com o cavaco.

Evidenciou-se nesse experimento que, apesar do cavaco ser de massa porosa, por algum motivo a água escoou quase que totalmente pela região superficial da amostra, com pouca retenção em seu interior, sendo que foi menos intensa nas seguintes situações:

- onde a declividade era maior;
- onde a compactação era maior e;
- onde a incidência de folhas e partículas finas era maior.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As amostras que foram coletadas da camada superficial até 30 cm de profundidade da leira, com umidade média em base seca de 37,9%, apresentaram 2,39 vezes mais umidade em base úmida que as amostras retiradas em uma profundidade superior a 35 cm, onde o cavaco apresentava aspecto de menor umidade que do lado externo. Estes resultados levam a considerar a possibilidade em deixar os cavacos expostos às intempéries para posterior utilização industrial, no entanto que antes se retire esta camada externa mais úmida.

Em nível industrial, quanto à preparação da biomassa antes de direcioná-la às fornalhas, primeiramente deve-se considerar as condições aqui propostas de disposição dos resíduos após o corte das árvores, conforme a seguir:

a) diante da não possibilidade em dispor os resíduos em lugares cobertos e como meio de reduzir os custos de secagem, transporte e manuseio da biomassa e melhorar seu potencial calorífico, pelo fato de que, após a poda, os galhos apresentaram perdas significativas de umidade – ocasionado principalmente pela secagem das folhas nos primeiros dias, – recomenda-se que se disponibilize, nestes primeiros dias, os galhos amontoados em leiras, em ambiente aberto, mesmo que sujeito às intempéries, sem precisar de secagem forçada. Essa primeira disponibilização poderá reduzir seu peso em relação à base seca e perda de umidade remanescente da biomassa;

b) somente após esta pré secagem dos galhos, recomenda-se triturá-los. Entre esta trituração e a disposição em leiras antes de utilizá-los em fornalhas, recomenda-se esperar até duas semanas para que percam quantidades mais significativas de umidade;

c) ao dispor os cavacos em leiras, foi recomendado cobrir sua camada externa com folhas trituradas, propiciando desta forma maior proteção à água da chuva, reduzindo consideravelmente sua percolação, conforme constatado em ensaios. Para sua utilização, recomenda-se remover a camada externa de cavaco na leira, em torno de 30 cm, tendo em vista que foi a camada que apresentou maior teor de umidade (37,9%). Abaixo desta profundidade, decrescia significativamente, de acordo com levantamentos das taxas de umidade (23,9%).

Com a utilização mais intensa desta biomassa residual, existe também, a possibilidade de se reduzir volumes e custos pela não disponibilização dos resíduos de poda urbana em aterros sanitários.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste trabalho, onde apresentou diferenças significativas de umidade entre a região superficial da leira de cavaco comparado ao seu interior, abaixo dos 30 cm de profundidade e a dificuldade em que a água apresentou para percolar entre os meandros superficiais da leira, conclui-se como delineamento estratégico do ponto de vista técnico, econômico e operacional, respeitando as metodologias apresentadas para a preparação da biomassa, que, pode-se destacar como alternativa este método de secagem depositando a leira em pátio aberto, principalmente quando não se tem a disponibilidade de galpões ou os custos para armazenamento e secagem dessa biomassa em pátio coberto sejam elevados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGUILAR, F. X.; SONG, N.; SHIFLEY, S. R. Review of consumption trends and public policies promoting woody biomass as an energy feedstock in the U.S. Biomass and Bioenergy, Volume 35, Vol. 8, August 2011.
2. BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas. 1ª. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
3. CHEN, L.; LI, X.; WEN, W.; JIA, J.; LI, G.; DENG, F. The status, predicament and countermeasures of biomass secondary energy production in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.
4. DERCAN, B. et al. Possibility of efficient utilization of wood waste as a renewable energy resource in Serbia. Renewable and Sustainable Energy, Vol. 16, Issue 3, abr. 2012.
5. FOWLER, P.; KRAJACIĆ, G.; LONČAR, D.; DUIĆ, N. Modeling the energy potential of biomass – H2RES. International Journal of Hydrogen Energy, 2009.
6. GRACIA, C.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. e ESTORNELL, J. An application of the vehicle routing problem to biomass transportation. Biosystems Engineering, Vol. 124, Aug. 2014, Pg. 40–52, 2014.
7. Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Governo Federal. Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática 2015. Dados de julho de 2013 a setembro de 2015. Acessado em http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTgwNw.
8. JÄPPINEN, E.; KORPINEN, O.J.; RANTA, T. The effects of local biomass availability and possibilities for truck and train transportation on the greenhouse gas emissions of a small-diameter energy wood supply chain. Bio Energy Research, 2012.
9. KASMIOUI, O.; CEULEMANS, R. Financial analysis of the cultivation of short rotation woody crops for bioenergy in Belgium: Barriers and opportunities. Bioenergy Research, Vol. 6, pg. 336-350, 2013.

10. KLITZKE, R.J. Secagem da madeira. In: NOGUEIRA M. F. M.; OLIVEIRA, J. T. S. e FIEDLER, N. C. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2007. 1Ed.V.1, 426p.
11. MELLADO, E.C.E.R. Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus. 2007. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
12. ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil. Trad. Rocha, J. D. e Rocha, M. P. D. Editora Unicamp: Campinas, 2008.
13. SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da gaseificação de biomassa. Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, UNICAMP, Editora Átomo Ltda., Campinas-SP 2010.
14. SANTOS, G. R. V., JANKOWSKY, I. P. e ANDRADE, A. Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis* Characteristic drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber. Scientia Forestalis n. 63, p. 214-220, jun. 2003.
15. VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; ANNEVELINK E. GIS application to define biomass collection points as sources for linear programming of delivery networks. Transactions of ASABE, 52 (2009), pp. 1069–1078.
16. YOSHIOKA T. et al. A case study on the costs and the fuel consumption of harvesting, transporting, and chipping chains for logging residues in Japan. Biomass and Bioenergy, Vol. 30, 4 Ed., p. 342-348, abr. 2006.