

## UMIDADE DE EQUILÍBRIO NO CARVÃO VEGETAL EXPOSTO A DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE RELATIVA

Paulo Fernando Trugilho\*; Daniellle Gomes Marconato<sup>1</sup>; Jonas Zefanias Massuque<sup>1</sup>; Natalia  
Moraes Mazzuchi<sup>1</sup>; Thaiane de Abreu Salgado<sup>1</sup>; Paulo Henrique Muller da Silva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), Piracicaba/SP, Brasil.

\* e-mail do autor correspondente: [trugilho@ufla.br](mailto:trugilho@ufla.br)

**Resumo:** O objetivo do trabalho foi determinar a umidade de equilíbrio do carvão vegetal produzido para fins industriais de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* com 6 anos de idade exposto a diferentes condições de temperatura e umidade relativa. Quatro espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* foram utilizadas na pesquisa. Quatro amostras de carvão por espécie foram acondicionadas em diferentes condições de umidade relativa a 30°C em câmara de climatização. As massas das amostras foram monitoradas até atingirem valores constantes em cada condição de exposição na câmara. No fim do experimento foram obtidas as massas secas. As estimativas de umidades médias gerais de equilíbrio foram ligeiramente maiores nas espécies de *Eucalyptus* em todas as condições de umidade relativa, exceto para 90%. O modelo linear simples foi o que apresentou o melhor ajuste para as espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus*. A diferença entre as estimativas de umidade de equilíbrio do carvão das espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* foi maior nas condições de umidade relativa mais baixas.

**Palavras-chave:** Câmara de climatização, Higrscopicidade, Biorredutor, Siderurgia

## EQUILIBRIUM MOISTURE IN CHARCOAL EXPOSED TO DIFFERENT RELATIVE HUMIDITY CONDITIONS

**Abstract:** This research aimed to evaluate the equilibrium moisture content of charcoal produced for industrial purposes from 6-year-old *Eucalyptus* and *Corymbia* species exposed to different temperature and relative humidity conditions. Four species of *Eucalyptus* and *Corymbia* were used in the study. Four samples of charcoal per species were placed in different conditions of relative humidity at 30°C in a climatic chamber. The masses of the samples were monitored until they reached constant values in each exposure condition in the chamber. At the end of the experiment, the dry masses were obtained. Overall average equilibrium moisture estimates were slightly higher in *Eucalyptus* species in all relative humidity conditions, except for 90%. The simple linear model presented the best fit for *Corymbia* and *Eucalyptus* species. The difference between *Corymbia* and

*Eucalyptus* equilibrium moisture of charcoal was greater at lower relative humidity conditions.

**Keywords:** Climatic chamber; Hygroscopicity; Bioreducer; Steel industry

## 1. INTRODUÇÃO

A umidade é um dos fatores que mais afeta negativamente o poder calorífico dos combustíveis tradicionais, além de outras características importantes especialmente nos materiais sólidos. A higroscopicidade está associada à presença de grupos funcionais hidroxílicos (-OH) disponíveis nos materiais e que tem a capacidade de se ligarem, por ligações de hidrogênio, à água presente no ambiente, o que provoca aumento, na adsorção, ou redução, na dessorção, do seu conteúdo de umidade. A umidade de equilíbrio dos materiais lignocelulósicos está associada a disponibilidade de tais grupos funcionais presentes em seus polímeros e macromoléculas estruturais.

A carbonização, assim como a secagem, vai promover a redução dos grupos funcionais hidroxílicos (-OH) disponíveis para ligação com a água, o que vai provocar redução na umidade de equilíbrio dos materiais carbonizados. A temperatura de carbonização afeta diretamente a disponibilidade de grupos funcionais no carvão vegetal [2 e 6], o que afetará a sua higroscopicidade.

A umidade de equilíbrio é importante característica associadas aos combustíveis hidrocarbonetos, incluindo o carvão vegetal. O conteúdo de umidade reduz a sua resistência mecânica, em função da expansão do vapor d'água quando o mesmo é aquecido, na liberação excessiva de fumaça, nas propriedades de ignição e na baixa combustibilidade [1 e 4].

A higroscopicidade é característica relevante devido a sua implicação no uso final do carvão vegetal. Pesquisas para definir o comportamento desse produto na sua utilização e exposição aos diferentes ambientes, tanto na produção como nas condições de armazenamento são necessárias. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi determinar a umidade de equilíbrio do carvão vegetal produzido para fins industriais de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* com 6 anos de idade exposto a diferentes condições de umidade relativa em câmara de climatização.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Origem das Espécies e Amostragem

Os materiais genéticos são provenientes de plantios experimentais de *Eucalyptus* e *Corymbia* (latitude 28° 48' e longitude 48° 54' e altitude de 711 m), em espaçamento de 3,0 x 2,6 m (7,8 m<sup>2</sup>), aos seis anos de idade, localizado no Município de Paraopeba, Estado de Minas Gerais,

Brasil. De acordo com a classificação de Köppen o clima da região é Cwa. A precipitação média anual é de 1300 mm, altitude de 750 m e temperatura média de 20,4 °C.

Quatro espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* foram utilizadas na pesquisa. Quatro amostras de carvão vegetal foram utilizadas por espécie. As amostras de carvão foram obtidas em forno elétrico (mufla) com a madeira previamente seca em estufa a 103±2°C. A temperatura inicial, taxa de aquecimento, temperatura final de carbonização e tempo de residência foram de 100°C, 100 °C h<sup>-1</sup>, 450°C e 30 minutos, respectivamente [7].

## 2.2 Condições de Umidade Relativa e Temperatura em Câmara de Climatização

As amostras de carvão vegetal foram condicionadas na temperatura de 30°C e umidade relativa variando de 90 a 40% com intervalo de 10% em câmara de climatização Hotpack. Em cada condição de exposição do carvão vegetal, a massa das amostras foi monitorada em balança analítica (0,0001g) até a sua estabilização em período de 24h entre duas pesagens. A umidade de equilíbrio das amostras foi atingida sempre por dessorção. Atingida a condição de equilíbrio higroscópico todas as amostras foram pesadas. Ao final do experimento a massa seca das amostras e sua umidade de equilíbrio foram determinadas. A massa seca das amostras de carvão foram obtidas após secagem em estufa calibrada a 103±2°C por período de 2 horas.

Na avaliação do experimento foi adotada a análise de regressão linear dentro de *Corymbia* e *Eucalyptus*, em que os modelos de variação da umidade de equilíbrio foram ajustados em função da umidade relativa. Foram testados 12 modelos de regressão, em que a seleção do melhor modelo foi realizada pela significância da regressão, pelo teste F, significância dos coeficientes de regressão, pelo teste t, ambos em nível de 5%, pelo coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup> ajustado), coeficiente de variação do modelo e a análise gráfica dos resíduos. Os modelos foram ajustados utilizando-se do software Sistema de Análises Estatísticas (SAEG) versão 5.0, pacote REGREAMD1.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados médios das umidades de equilíbrio das espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* da encontram-se na Tabela 1. As estimativas de umidades de equilíbrio médias gerais foram ligeiramente maiores nas espécies de *Eucalyptus* em todas as condições de umidade relativa, exceto para 90%. A tendência observada foi de aumento da umidade de equilíbrio do carvão em função do aumento da umidade relativa de condicionamento em câmara de climatização. Efeito semelhante também foi observado por [5], que avaliaram a higroscopicidade do carvão produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização e duas condições de umidade relativa, e [3], que avaliou o

carvão condicionado em diferentes condições de umidade relativa e produzido em diferentes temperaturas (340 a 460 °C).

Tabela 1: Umidade de equilíbrio média das espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus*

Espécie	Umidade Relativa (%)					
	40	50	60	70	80	90
CC	4,84	5,63	6,30	6,90	7,68	8,70
CCV	4,75	5,54	6,19	6,76	7,51	8,60
CH	4,89	5,66	6,29	6,78	7,58	8,50
CT	4,59	5,30	5,92	6,40	7,13	8,85
Média	4,77	5,53	6,18	6,71	7,47	8,66
EA	5,34	6,09	6,70	7,23	7,93	8,98
EL	5,39	6,16	6,79	7,30	7,99	8,51
EM	5,19	5,93	6,54	7,01	7,68	8,56
EU	5,28	5,99	6,56	6,97	7,62	8,20
Média	5,30	6,04	6,65	7,13	7,80	8,56

CC = *Corymbia citriodora* subesp. *citriodora*, CCV = *C. citriodora* subesp. *variegata*, CH = *C. henryi*, CT = *Corymbia torelliana*, EA = *E. amplifolia*, EL = *E. longirostrata*, EM = *Eucalyptus major*, EU = *Eucalyptus urophylla*.

A análise de variância da regressão mostrou que, dentre os 12 modelos ajustados, o linear simples foi o que obteve o melhor ajuste dos dados para as espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus*. A Tabela 2 apresenta os modelos ajustados, seus coeficientes de determinação e de variação, enquanto a Figura 1 mostra a diferença observada na umidade de equilíbrio do carvão em função da umidade relativa. Na Figura 1 é possível verificar que a diferença entre as estimativas de umidade de equilíbrio do carvão das espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* tende a reduzir com o aumento da umidade relativa.

Tabela 2: Modelos lineares simples ajustados, seus coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e variação (CV)

Material			$r^2$	CV (%)
<i>Corymbia</i>	1,76032	0,073734**	0,9538	4,27
<i>Eucalyptus</i>	2,81498	0,063066**	0,9435	4,09

\*\* significativo em nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”. CV = coeficiente de variação.

Figura 1: Diferença observada na umidade de equilíbrio do carvão em função da umidade relativa

#### 4. CONCLUSÕES

As estimativas de umidades médias gerais de equilíbrio foram ligeiramente maiores nas espécies de *Eucalyptus* em todas as condições de umidade relativa, exceto para 90%;

O modelo linear simples foi o que apresentou o melhor ajuste para as espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus*;

A diferença entre as estimativas de umidade de equilíbrio do carvão das espécies de *Corymbia* e *Eucalyptus* foi maior nas condições de umidade relativa mais baixas.

## 5. REFERÊNCIAS

- [1] Brahan, W. K. Combustibilidad de la madera: la experiencia con especies colombianas. 1. Bogotá: Fondo de Publicaciones. 2002.
- [2] Bruun, E.W.; Hauggaard-Nielsen, H.; Ibrahim, N.; Egsgaard, H.; Ambus, P.; Jensen, P.A.; Dam-Johansen, K. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. *Biomass Bioenergy*. 2011; 35, 1182–1189.
- [3] Costa, L. J. Relação água-carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas. Viçosa/MG, UFV, 2020, 105 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Florestal).
- [4] Dias Júnior, A.F.; Brito, J. O.; Andrade, C.R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. *Revista Árvore*. 2015; 39 (6). <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000600016>.
- [5] Dias Junior, A. F.; Pirola, L. P.; Takeshita, S.; Lana, A. Q.; Brito, J. O.; Andrade, A. M.; Souza, N. D. Higroscopicidade do carvão vegetal produzido em diferentes temperaturas. In: *Anais do III VCBCTEM, Florianópolis/SC, 04 a 06 de setembro, 2017*, 8 p.
- [6] Kan, T., Strezov, V., Evans T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renew Sustain Energy Rev*. 2016; 57: 1126–40. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>.
- [7] Trugilho, P.F.; Lima, J.T.; Mori, F.A; Lino, A.L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Cerne*. 2001; 7 (2): 104–114.