

# PERDA DE CARGA NO FLUXO DE AR FORÇADO EM COLUNAS DE MATERIAL ORGÂNICO COM DIFERENTES PROFUNDIDADES E ESTÁDIOS DE DEGRADAÇÃO BIOQUÍMICA

Débora Astoni Moreira<sup>1</sup>, Antonio Teixeira de Matos<sup>2</sup>, Márcia Aparecida Sartori<sup>3</sup>, Nara Cristina Lima Silva<sup>3</sup>, Renata Tâmara Pereira de Barros<sup>4</sup> e Fátima Aparecida R. Luiz<sup>5</sup>

## RESUMO

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a variação na pressão estática do ar, quando forçado a passar através de colunas de composto orgânico com diferentes tempos de maturação e alturas de material. Para a realização do experimento, montou-se uma pilha de compostagem com bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, preparando-se a mistura de forma a obter uma relação C/N inicial de 30/1. O material foi revolvido a cada três dias, durante o primeiro mês, seguindo-se revolvimento a intervalos regulares de 5 dias, durante 2 meses. Em colunas de 1 m de altura, preenchidas com bagaço de cana-de-açúcar ou com a mistura bagaço + cama de frango, nas condições em que se encontravam após 30, 60 e 90 dias de compostagem, foi medida a perda de carga. A pressão estática aumentou de forma direta e proporcional ao logaritmo da profundidade da coluna vertical de composto orgânico. O decréscimo nos valores da pressão estática do ar aumentou com o aumento no fluxo de ar, imposto pelo ventilador e com o tempo de degradação bioquímica do material em compostagem, sendo que esse decréscimo ocorreu direta e proporcionalmente ao logaritmo da profundidade da coluna vertical de composto orgânico.

**Palavras-chave:** compostagem, leiras estáticas aeradas, perda de carga, potência do ventilador

## ABSTRACT

### Loss of load from the forced air through organic material columns at different depths and biochemical degradation stages

This study was done to evaluate the variation in the static pressure of air forced to pass through organic compost columns at different maturation periods and heights. The composting pile was set up by mixing sugarcane bagasse and chicken bed, in proportions to obtain initial C/N ratio of 30:1. The mixture was mixed and overturned at 3-day interval during the first month, followed by at 5-day interval for next two months. After 30, 60 or 90-day composting, one meter high columns, were filled with sugar cane bagasse alone or mixed with chicken bed, to measure the load loss of air forced through it. The static pressure increased directly and proportionally to the logarithm of compost's columns height. However, it decreased with increasing air flow from the fan, and with increasing time period for biochemical degradation of the material under composting, and was directly proportional to the logarithm of the compost column height

**Keywords:** composting, aerated static ridges, head loss, power ventilator

---

Recebido para publicação em 10.10.2007

<sup>1</sup> Bacharel em Química, Doutoranda em Eng. Agrícola, Depto. de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>2</sup> Engenheiro Agrícola, Prof. Adjunto, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>3</sup> Engenheiro Agrícola e Ambiental, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>4</sup> Estudante de Engenharia Agrícola e Ambiental, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

<sup>5</sup> Engenheira Agrícola, mestrandia em Eng. Agrícola, Depto. de Eng. Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

## INTRODUÇÃO

A compostagem é o processo por meio do qual se obtém a decomposição biológica controlada de resíduos orgânicos, os quais são transformados em material parcialmente humificado (Kiehl, 2001). Segundo Metcalf & Eddy (2003), a compostagem é uma alternativa de baixo custo e, ambientalmente, saudável para estabilização de biossólidos.

A aeração do material em compostagem pode ser realizada por reviramento manual (processo Windrow) ou por meio de ar forçado com auxílio de ventiladores.

No sistema com ventilação forçada, o material a ser compostado é disposto sobre uma rede tubular perfurada, por onde o ar é soprado ou aspirado mecanicamente, não sendo feito qualquer revolvimento mecanizado na leira (Pinto, 2001). No sistema de pilhas estáticas aeradas, o material é compostado em 21 a 28 dias, seguindo-se um período de cura, sem aeração forçada, durante 30 ou mais dias (Metcalf & Eddy, 2003). Tipicamente, as pilhas são de 2,0 a 2,5 m de altura.

Na aeração forçada são utilizados ventiladores que, por meio de um rotor dotado de pás adequadas, acionado por motor, promovem a transformação da energia mecânica do rotor em energia potencial de pressão e energia cinética. Com a energia adquirida, o ar flui através da camada de material no qual foi forçado a passar (Afonso, 1994; Lasseran, 1981).

Segundo Pinto (2001), os ventiladores de 0,5 a 2 HP têm sido considerados suficientes, para atender às necessidades de ar de  $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$  seca de material orgânico em compostagem.

Ao ser forçado a fluir na massa de material, o ar encontra resistência, que provoca um gradiente de pressão estática, também denominado como perda de carga, que pode ser medido por meio de manômetros (Araújo, 1986; Athié et al., 1998).

Segundo Lasseran (1981) os ventiladores são escolhidos com vistas a fornecerem

determinada vazão de ar, sob determinada pressão, sendo seu desempenho definido, principalmente, por estas duas variáveis.

O cálculo da potência do ventilador é função da vazão de ar, pressão estática total e eficiência do ventilador. Convencionalmente, esta pressão é determinada por meio de equações ou gráficos que relacionam a perda de pressão por unidade de espessura da camada do produto com a densidade de fluxo de ar, ou seja, com a vazão do ar por unidade de área (Araújo, 1986). Pouco se sabe sobre a potência, demandada inicialmente pelo ventilador e a sua alteração durante o estágio de degradação do material em compostagem.

Lasseran (1981) afirmou que a perda de carga do ar, ao atravessar a massa de grãos depende da natureza do material, do seu peso específico, da altura da camada, da forma de distribuição dos grãos e da velocidade média do escoamento do ar.

Os grãos mais esféricos e com maior peso específico proporcionam menor perda de carga no ar insuflado na camada deste material. A perda de carga do ar, ao atravessar uma massa de grãos varia com o quadrado da velocidade do ar, enquanto, para a mesma velocidade do ar, a perda de pressão total varia linearmente com a altura da camada de grãos, podendo ser obtida por meio da equação 1:

$$P = \Delta P \times H \quad (1)$$

em que

P = perda de pressão total devido ao material;

$\Delta P$  = perda da pressão por unidade de altura de massa; e

H = altura da massa de material.

Considerando a escassa disponibilidade de informações concernentes a resistência que o composto orgânico, em diferentes estádios de degradação bioquímica oferece à passagem de ar, o presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a variação na pressão estática do ar, quando este é forçado a passar através de colunas de composto orgânico com diferentes tempos de maturação e diferentes alturas de material.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para produção do composto orgânico, optou-se por trabalhar com a mistura bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, pois são dois resíduos com ampla disponibilidade na região. O experimento foi realizado no Setor de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Nos resíduos, o teor de água foi quantificado por meio do método padrão de estufa, enquanto a massa específica foi medida, acondicionando-se uma amostra de massa conhecida em proveta de 1.000 mL.

Para condução do experimento, montou-se uma pilha de compostagem com bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, preparando-se a mistura de forma a obter uma relação C/N inicial de 30/1. O nitrogênio (N) foi obtido pelo método Kjeldahl. Para quantificação do conteúdo de carbono orgânico total, a amostra foi secada em estufa a 105<sup>o</sup>, a fim de obter a concentração de sólidos totais (ST), sendo posteriormente, queimada em mufla, à temperatura de 550 <sup>o</sup>C, para obtenção dos sólidos fixos (SF). A diferença (ST – SF) representa os sólidos voláteis (SV), cujo valor foi dividido por 1,724 para obtenção do carbono orgânico, em dag kg<sup>-1</sup>. O material foi revolvido a cada três dias, durante o primeiro mês, seguindo-se o revolvimento em intervalos regulares de 5 dias, durante 2 meses.

A medida da perda de carga do ar forçado, ao passar em uma coluna de bagaço de cana-de-açúcar, antes do início do processo de degradação bioquímica do material e após sua mistura com a cama de frango, em 1 m de espessura de coluna, foi realizada após 30, 60 e 90 dias de compostagem do material. Para tal, utilizou-se uma estrutura constituída pelos seguintes componentes: (1) coluna de chapa galvanizada, medindo 1,0 m de altura, com seção circular de 0,30 m de diâmetro; (2) tomadas para medição da pressão estática, representadas por sete tubos de cobre (5 mm de diâmetro) distanciados em 0,20 m no sentido vertical, em torno da coluna; (3) piso perfurado, constituído por chapa com furos circulares;

(4) câmara *plenum*, em madeira, de seção quadrada (0,55 x 0,55 m) com 0,33 m de altura; (5) tubo de chapa galvanizada, medindo 1,20 m de comprimento por 0,10 m de diâmetro, responsável pela condução do ar insuflado pelo ventilador até o plenum; (6) homogeneizador, para uniformização do fluxo de ar; (7) ventilador centrífugo de pás retas, acionado por motor elétrico com potência de 3 cv em 1710 rpm; e (8) diafragma fixo à entrada de ar, para possibilitar variação na vazão (Figura 1). A pressão estática do ar na câmara plenum foi medida, utilizando-se um manômetro diferencial inclinado nas posições verticais de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0 m.

O enchimento da coluna foi realizado, com camadas de 0,20 m, colocando-se o bagaço de cana-de-açúcar e o material orgânico em compostagem, após diferentes tempos de maturação, até atingir uma altura de 1,0 m,

As medições de queda na pressão estática do ar, forçado nas pilhas de material em compostagem, foram realizadas com 3 repetições, para cada estágio de maturação, utilizando-se os fluxos de ar, apresentados no Quadro 1, que foram proporcionados pelas aberturas de 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 cm no diafragma (número 8 da Figura 1).

Os dados de perda de carga foram utilizados para o ajuste de equações matemáticas, que expressam a variação na pressão estática do ar em função da profundidade da camada e do tempo de degradação bioquímica do material.

A potência absorvida pelo ventilador foi obtida, utilizando-se a equação 2:

$$\text{Pot} = \frac{\Delta P \times Q}{\eta} \quad (2)$$

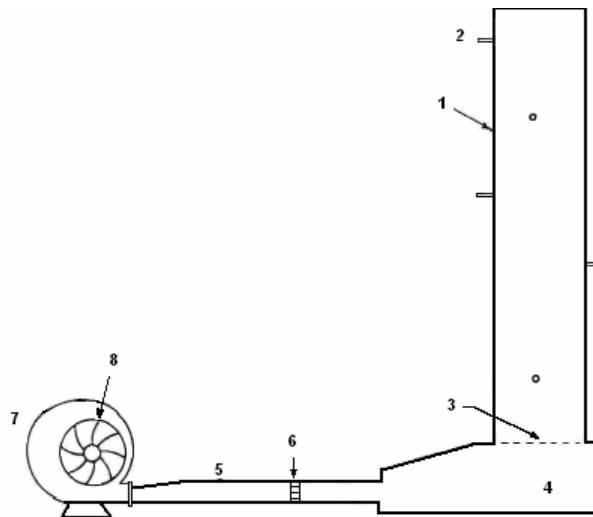
em que

Pot = potência elétrica absorvida pelo ventilador (W);

$\Delta P$  = pressão total fornecida pelo ventilador (Pa);

Q = vazão de ar (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); e

$\eta$  = rendimento do ventilador (adimensional).



**Figura 1.** Esquema de protótipo utilizado na determinação do gradiente de pressão estática sob diferentes fluxos de ar.

**Quadro 1.** Vazão de ar em função da altura do material em compostagem, para diferentes aberturas de diafragma

Abertura do diafragma (cm)	Altura (m)	Vazão de ar ( $m^3 s^{-1}$ )			
		Bagaço de cana-de-açúcar	Composto		
			(30 dias)	(60 dias)	(90 dias)
1,5	0,2	0,0211	0,0278	0,0287	0,0176
	0,4	0,0271	0,0300	0,0368	0,0159
	0,6	0,0345	0,0351	0,0479	0,0105
	0,8	0,0428	0,0402	0,0592	0,0059
	1,0	0,0423	0,0562	0,0672	0,0044
3,0	0,2	0,0407	0,0593	0,0550	0,0366
	0,4	0,0511	0,0651	0,0651	0,0228
	0,6	0,0634	0,0677	0,0812	0,0174
	0,8	0,0758	0,0730	0,0943	0,0133
	1,0	0,0778	0,0841	0,1020	0,0063
4,5	0,2	0,0729	0,1222	0,1088	0,0615
	0,4	0,0927	0,1307	0,1214	0,0368
	0,6	0,1097	0,1417	0,1401	0,0336
	0,8	0,1208	0,1456	0,1537	0,0271
	1,0	0,1232	0,1539	0,1561	0,0144
6,0	0,2	0,1063	0,1818	0,1625	0,1112
	0,4	0,1312	0,1854	0,1769	0,0632
	0,6	0,1547	0,1874	0,1821	0,0470
	0,8	0,1701	0,1934	0,1800	0,0338
	1,0	0,1699	0,1888	0,1830	0,0214
7,5	0,2	0,1386	-	0,2454	0,1401
	0,4	0,1647	-	0,3673	0,0859
	0,6	0,1867	-	0,3788	0,0586
	0,8	0,1966	-	0,3908	0,0382
	1,0	0,1962	-	0,3873	0,0245

Com base nos valores de perda de carga, foi estimada a altura máxima da camada de material (bagaço de cana-de-açúcar + cama de frango) no estágio final de degradação bioquímica, de forma a demandar a mesma potência absorvida inicialmente pelo ventilador, pois o mesmo equipamento deverá ser utilizado durante todo o período de compostagem com aeração forçada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

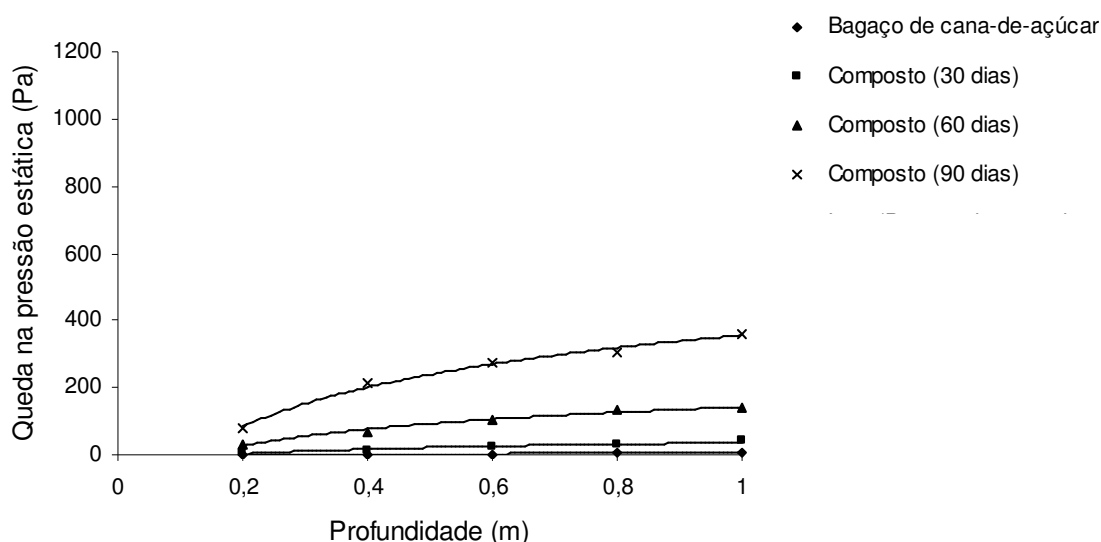
Os valores médios da massa específica do bagaço de cana-de-açúcar, cama de frango e do composto com 90 dias de maturação, o teor de água base seca e massa de bagaço de cana-de-açúcar, cama

de frango e material em compostagem, com 30, 60 e 90 dias de maturação estão apresentados no Quadro 2.

A variação na pressão estática do ar, quando forçado a passar na coluna de bagaço de cana-de-açúcar e no composto orgânico em diferentes estádios de maturação, em cinco profundidades e cinco aberturas do diafragma (1,5; 3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 cm), é apresentada nas figuras 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Foram ajustadas equações matemáticas de queda na pressão estática do ar (perda de carga) em função da altura do material, utilizando-se o programa computacional Excel 2003. Os resultados são apresentados nos quadros 3, 4, 5, 6 e 7.

**Quadro 2.** Teor de água, massa fresca e massa específica dos materiais avaliados na coluna

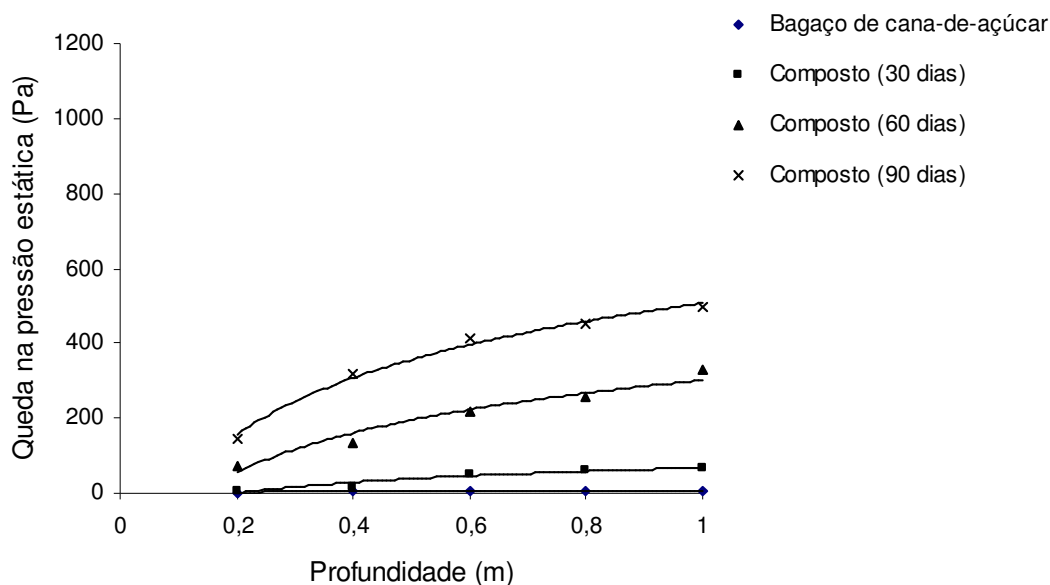
Material	Teor de água (dag kg <sup>-1</sup> )	Massa fresca (kg)	Massa específica na coluna (kg m <sup>-3</sup> )
Bagaço de cana-de-açúcar	8,03	4,3	56
Cama de frango	42,48	28,5	283
Composto (30 dias)	82,50	27,8	215
Composto (60 dias)	78,55	27,3	216
Composto (90 dias)	68,66	30,0	252



**Figura 2.** Efeito da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material, para a abertura do diafragma de 1,5 cm.

**Quadro 3.** Equação ajustada para variação na pressão estática do ar insuflado (Pa) em função da altura da camada de bagaço de cana-de-açúcar e de composto orgânico (m), para abertura do diafragma de 1,5 cm

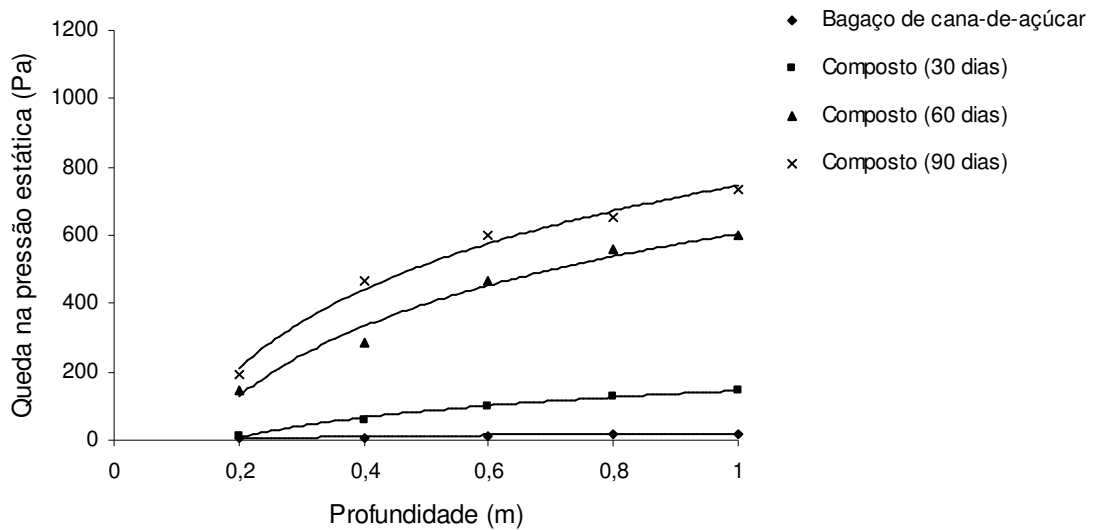
Material	Equação	R <sup>2</sup>
Bagaço de cana-de-açúcar	$\Delta P = 1,5858 \ln H + 3,7902$	0,920
Composto (30 dias)	$\Delta P = 21,207 \ln H + 36,285$	0,927
Composto (60 dias)	$\Delta P = 71,782 \ln H + 142,45$	0,988
Composto (90 dias)	$\Delta P = 169,57 \ln H + 356,43$	0,990



**Figura 3.** Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material, para a abertura do diafragma de 3,0 cm.

**Quadro 4.** Equação ajustada para variação na pressão estática do ar insuflado (Pa) em função da altura da camada de bagaço de cana-de-açúcar e de composto orgânico (m), para abertura do diafragma de 3,0 cm

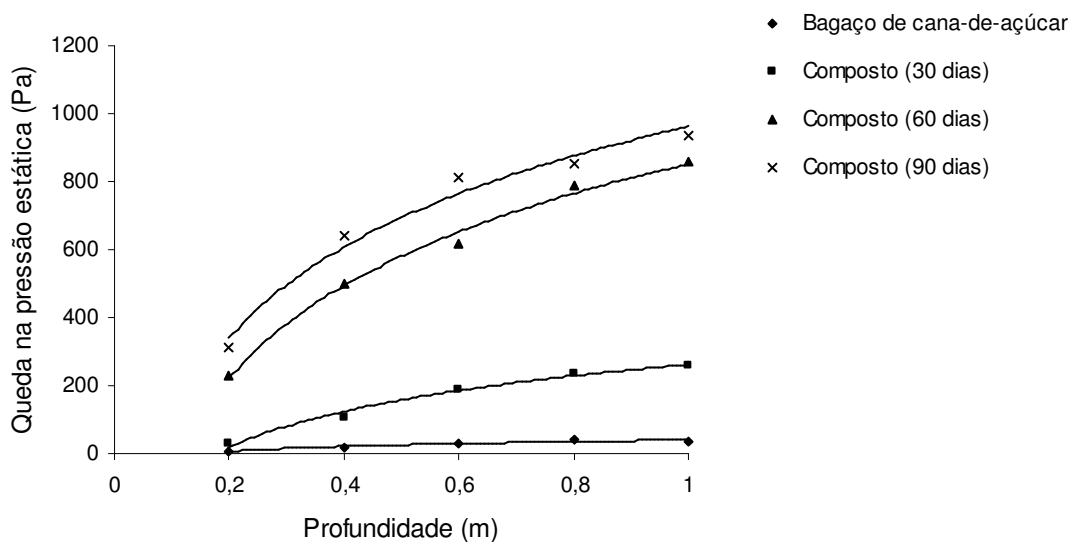
Material	Equação	R <sup>2</sup>
Bagaço de cana-de-açúcar	$\Delta P = 3,5476 \ln H + 7,8207$	0,969
Composto (30 dias)	$\Delta P = 42,141 \ln H + 67,744$	0,929
Composto (60 dias)	$\Delta P = 152,87 \ln H + 301,29$	0,951
Composto (90 dias)	$\Delta P = 218,19 \ln H + 507,53$	0,991



**Figura 4.** Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação pressão da estática do ar insuflado em uma coluna de material para a abertura do diafragma de 4,5 cm.

**Quadro 5.** Equação ajustada para variação na pressão estática do ar insuflado (Pa) em função da altura da camada de bagaço de cana-de-açúcar e de composto orgânico (m), para abertura do diafragma de 4,5 cm

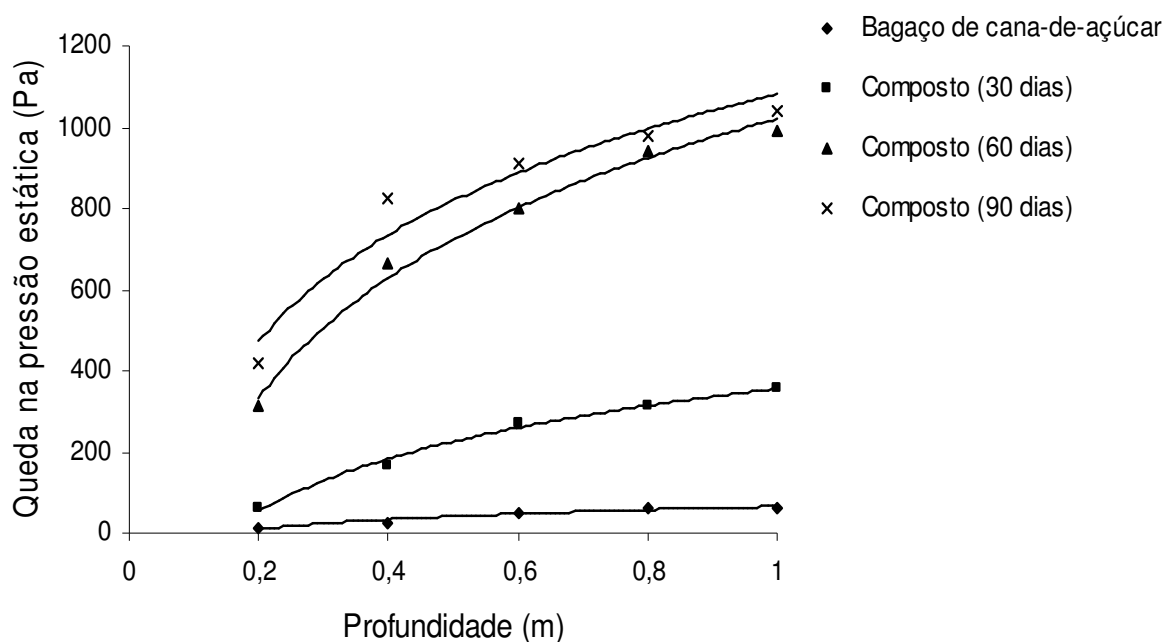
Material	Equação	R <sup>2</sup>
Bagaço de cana-de-açúcar	$\Delta P = 10,042 \ln H + 19,895$	0,939
Composto (30 dias)	$\Delta P = 85,423 \ln H + 144,79$	0,990
Composto (60 dias)	$\Delta P = 295,82 \ln H + 604,3$	0,978
Composto (90 dias)	$\Delta P = 331,56 \ln H + 745,36$	0,989



**Figura 5.** Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material para a abertura do diafragma de 6,0 cm.

**Quadro 6.** Equação ajustada para variação na pressão estática do ar insuflado (Pa) em função da altura da camada de bagaço de cana-de-açúcar e de composto orgânico (m), para abertura do diafragma de 6,0 cm

Material	Equação	R <sup>2</sup>
Bagaço de cana-de-açúcar	$\Delta P = 20,627 \ln H + 40,17$	0,991
Composto (30 dias)	$\Delta P = 150,87 \ln H + 262,35$	0,990
Composto (60 dias)	$\Delta P = 391,57 \ln H + 852,37$	0,992
Composto (90 dias)	$\Delta P = 386,63 \ln H + 961,97$	0,978



**Figura 6.** Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material para a abertura do diafragma de 7,5 cm.

**Quadro 7.** Equação ajustada para variação na pressão estática do ar insuflado (Pa) em função da altura da camada de bagaço de cana-de-açúcar e de composto orgânico (m), para abertura do diafragma de 7,5 cm

Material	Equação	R <sup>2</sup>
Bagaço de cana-de-açúcar	$\Delta P = 34,595 \ln H + 65,488$	0,946
Composto (30 dias)	$\Delta P = 188,74 \ln H + 356,28$	0,991
Composto (60 dias)	$\Delta P = 426,97 \ln H + 1020,1$	0,991
Composto (90 dias)	$\Delta P = 377,28 \ln H + 1080,4$	0,943



Observou-se aumento na pressão estática necessária para insuflação do ar nas colunas de material com o tempo de maturação do composto orgânico e da abertura do diafragma. Verificou-se, também, comportamento exponencial das curvas de variação na pressão estática do ar com o aumento na altura da camada de material, notadamente com o aumento do período de degradação bioquímica.

Para qualquer abertura do diafragma, a queda na pressão estática na camada de 1,0 m de bagaço de cana-de-açúcar não superou 65,5 Pa, enquanto no material que sofreu degradação bioquímica durante 90 dias os valores superaram 1000 Pa, quando foi utilizada a maior abertura do diafragma (7,5 cm).

Hall (1980) não encontrou diferenças na queda de pressão estática do ar, quando forçado a passar em colunas de igual massa de feno picado e não picado. O autor verificou que a maior queda na pressão estática do ar ao ser forçado, sob mesmo fluxo, na coluna de feno picado, foi compensada pela diminuição na altura de material, tendo em vista que o feno picado apresenta maior massa específica.

Hall (1980) propôs a utilização de modelos potenciais crescentes para relacionar a queda na pressão estática do ar com a profundidade de feno picado e não picado. No presente trabalho, tal comportamento não foi observado, sendo que as curvas apresentaram comportamento logarítmico, com tendência de obtenção de menores quedas na pressão estática do ar com o aumento na altura de material na coluna. Suspeita-se que este comportamento esteja associado à secagem do material em avaliação, pois, devido sua secagem pode estar havendo desentumescimento das partículas e, conseqüentemente, formação de maior espaço poroso no material, compensando o efeito de aumento da coluna de material.

Considerando-se que a vazão de  $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  de ar para cada tonelada de material seja adequada à aeração de material orgânico em compostagem (Pinto, 2001), a abertura de diafragma de 3,5 cm foi a que proporcionou faixa de vazão ( $0,0593$  a  $0,0841 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , conforme Quadro 1) na magnitude recomendada, com

base nos valores de massa específica do material aos 30,60 e 90 dias de compostagem, apresentados no Quadro 2. Empregando-se a Equação 2, para o cálculo da potência necessária do conjunto moto-ventilador, com uma eficiência de 60%. Obtém-se, para material com 30 dias de compostagem e pilha de 1 m de altura  $44,2 \text{ W t}^{-1}$ . Se a pilha tiver 2,0 m de altura, a potência demandada passa a ser de  $63,3 \text{ W t}^{-1}$ . Caso o material tenha 90 dias de compostagem, seriam exigidos  $278 \text{ W t}^{-1}$ , para 1,0 m de altura de pilha, e  $361 \text{ W t}^{-1}$ , para 2,0 m de altura de pilha. Esses valores estão abaixo dos citados por Pinto (2001), que foram de  $820,6 \text{ W t}^{-1}$  ( $1,1 \text{ HP t}^{-1}$ ).

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- O decréscimo nos valores da pressão estática do ar aumentou com o fluxo de ar imposto pelo ventilador e com o tempo de degradação bioquímica do material em compostagem;
- A queda na pressão estática do ar aumentou, direta e proporcionalmente, ao logaritmo da altura de composto orgânico no qual o ar foi insuflado;
- A potência demandada pelo conjunto moto-ventilador aumentou com o tempo de compostagem do material orgânico, razão pela qual a altura da pilha de material deverá ser aquela que compense a maior exigência de pressão estática.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO, A.D.L. Gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café (*Coffea arabica* L.) com diferentes teores de umidade. 1994. 68 p. Dissertação (Mestrado em Armazenamento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 1994.

ARAÚJO, L.G. Variação da perda de pressão, em camadas de grãos de soja (*Glycine max.* L.), em função de finos, da densidade de fluxo de ar e da espessura da camada. 1986. 65 p. Dissertação (Mestrado em Armazenamento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 1986.

ATHIÉ, I.; CASTRO, M. F.P.M.; GOMES, R.A.R. & VALENTIM, S.R.I. Conservação de grãos. Campinas, Fundação Cargil, 1988. 236 p.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI Publ. Co., 1980. 381p.

KIEHL, J.C. Produção de composto orgânico e vermicomposto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.22, n.212, p.40-52, 2001.

LASSERAN, J.C. Aeração de grãos. Viçosa: Centro Nacional de Armazenagem (Série Centreinar, **n. 2**), **1981. 128 p.**

METCALF & EDDY **Wastewater Engineering – Treatment and Reuse**. New York: Mc Graw Hill, 2003. 1817 p.

PINTO, M.T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI et al. (eds). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA-UFMG/SANEPAR. 2001 p.261-317.