

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

Débora Astoni Moreira¹, Antonio Teixeira de Matos², Márcia Aparecida Sartori³, Nara Cristina Lima Silva³, Renata Tâmara Pereira de Barros⁴ e Fátima Aparecida R. Luiz⁵

RESUMO

Objetivou-se, com a realização deste trabalho, 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 se obter uma relação C/N inicial de 30/1. O material foi revolvido a cada três dias, durante o primeiro mês, seguindo-se revolvimento em intervalos regulares de 5 dias, por mais 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, tendo sido esse decréscimo ocorrido de forma direta e proporcional 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 carried out to evaluate the variation in the static pressure of the air, when it is forced to pass through organic composite columns at both different maturation times and material heights. For accomplishing the experiment, a composting pile was set up with sugarcane bagasse and chicken bed, by preparing the mixture on such a way to obtaining an initial C/N relationship equal to 30/1. The material was revolved every three days during the first month, following the revolution at

¹ Bacharel em Química, Doutoranda em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

² Engenheiro Agrícola, Prof. Adjunto, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

³ Engenheiro Agrícola e Ambiental, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

⁴ Estudante de Engenharia Agrícola e Ambiental, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

⁵ Engenheira Agrícola, mestranda em Engenharia Agrícola, Depto. de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

regular 5-day intervals for 2 months more. In the sugarcane bagasse under the same conditions it was used in the mixture, as well as in the material of the bagasse + chicken bed mixture under the conditions they were after 30, 60 and 90 days under composting process, the load loss was measured at 1 m upwards the column height. The decrease in the values of the air static pressure was increased with either the increased air flow imposed by the fan and the biochemical degradation time of the material under composting process; such a decrease was proportional to the logarithm of the vertical column depth of the organic compost.

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

INTRODUÇÃO

A compostagem é o processo por meio do qual se obtém a decomposição biológica controlada de resíduos orgânicos, transformando-os 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 feita por reviramento manual (processo Windrow) ou por ar forçado, realizado 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, que deve ser seguido por um período de cura do material, sem aeração forçada, por 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 são máquinas 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 e Lasseran, 1981).

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

O ar, ao ser forçado a fluir na massa de material, encontra resistência que provoca um gradiente de pressão estática, também denominada perda de carga, que pode ser medido utilizando-se manômetros (Araújo, 1986 e 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 com 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.

Grãos mais esféricos e de maior peso específico são os que 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 que, para a mesma velocidade do ar, a perda de pressão total varia linearmente com a altura da camada de grãos, podendo ser obtida utilizando-se a Equação 1:

$$P = \Delta P \times H \quad \text{Eq. 1}$$

em que,

P = perda de pressão total devido ao material;

ΔP = perda da pressão por unidade de altura de massa;

H = altura da massa de material.

Considerando a existência de poucas informações abordando a resistência que o composto orgânico em diferentes estádios de degradação bioquímica oferece à passagem de ar, com a realização do presente trabalho objetivou-se avaliar a variação na pressão estática do ar, quando forçado a passar através de colunas de composto orgânico com diferentes tempos de maturação e diferentes alturas de material.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a produção do composto orgânico, optou-se por trabalhar com a mistura bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, por serem dois resíduos de grande disponibilidade na

região. O experimento foi realizado no Setor de Armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Nos resíduos, foram quantificados o teor de água, pelo método padrão de estufa, e a massa específica, a qual foi medida acondicionando-se uma amostra de massa conhecida em proveta de 1.000 mL.

Para a 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 se obter uma relação C/N inicial de 30/1. O nitrogênio (N) foi obtido pelo método Kjeldahl. Para a quantificação do conteúdo de carbono orgânico total, a amostra foi seca em estufa a 105^o, para a obtenção da concentração de sólidos totais (ST) e, posteriormente, queimada em mufla, sob temperatura de 550 °C, para obtenção dos sólidos fixos (SF). A diferença (ST – SF) representa os sólidos voláteis (SV), cujo valor foi dividido por 1,724 para a obtenção do carbono orgânico, em dag kg⁻¹. O material foi revolvido a cada três dias, durante o primeiro mês, seguindo-se de revolvimento em intervalos regulares de 5 dias, por mais 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 a sua mistura com a cama de frango, em 1 m de espessura de coluna, foi realizado 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; (8) diafragma fixo à entrada de ar, para possibilitar a variação na vazão (Figura 1). A pressão estática no 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, por 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 ser completada a altura de 1,0 m,

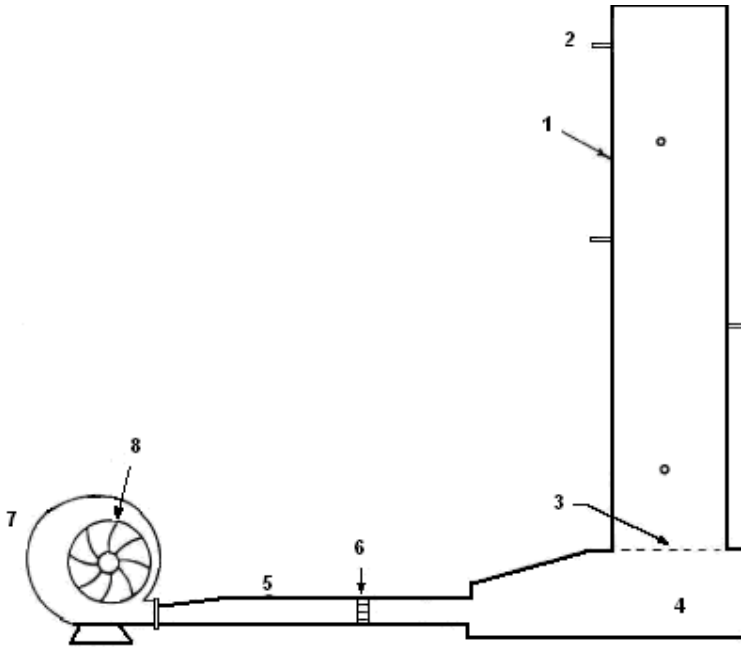


Figura 1. Esquema de protótipo utilizado na determinação do gradiente de pressão estática sob diferentes fluxos de ar.

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 como 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:

$$Pot = \frac{\Delta P \times Q}{\eta} \quad \text{Eq. 2}$$

em que,

Pot = potência elétrica absorvida pelo ventilador (W)

ΔP = pressão total fornecida pelo ventilador (Pa)

Q = vazão de ar ($m^3 s^{-1}$)

η = rendimento do ventilador (adimensional)

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 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)			
		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 obtidos, 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 se demandar a mesma potência absorvida inicialmente pelo ventilador já que 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.

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

Material	Teor de água (dag kg ⁻¹)	Massa fresca (kg)	Massa específica na coluna (kg m ⁻³)
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

A variação da pressão estática do ar, medida 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), estão apresentadas 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, estando os resultados apresentados nos Quadros 3, 4, 5, 6 e 7.

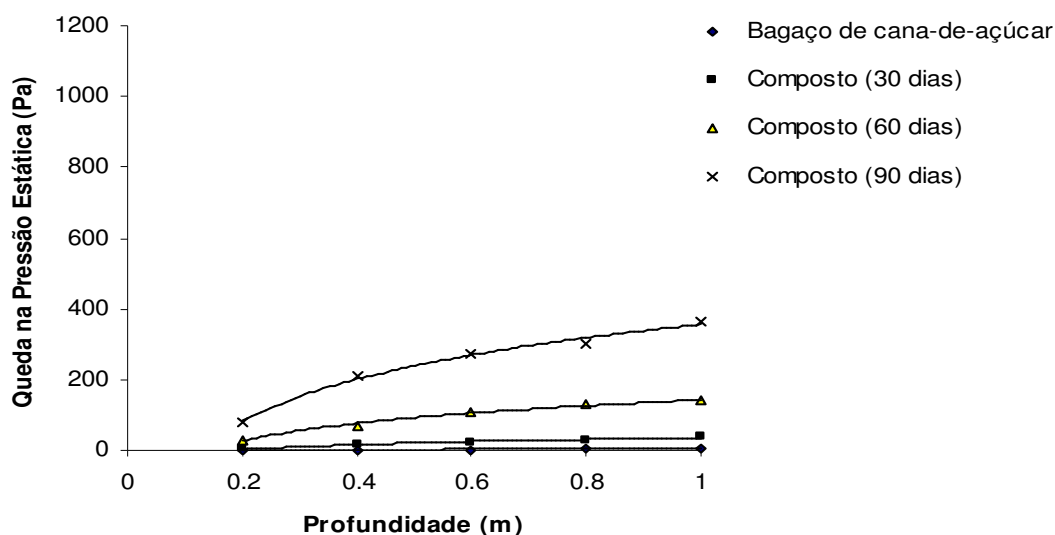


Figura 2. Efeito da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material, para a abertura do diafragma de 1,5 cm.

Quadro 3. Equação ajustada para variação da 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 ²
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

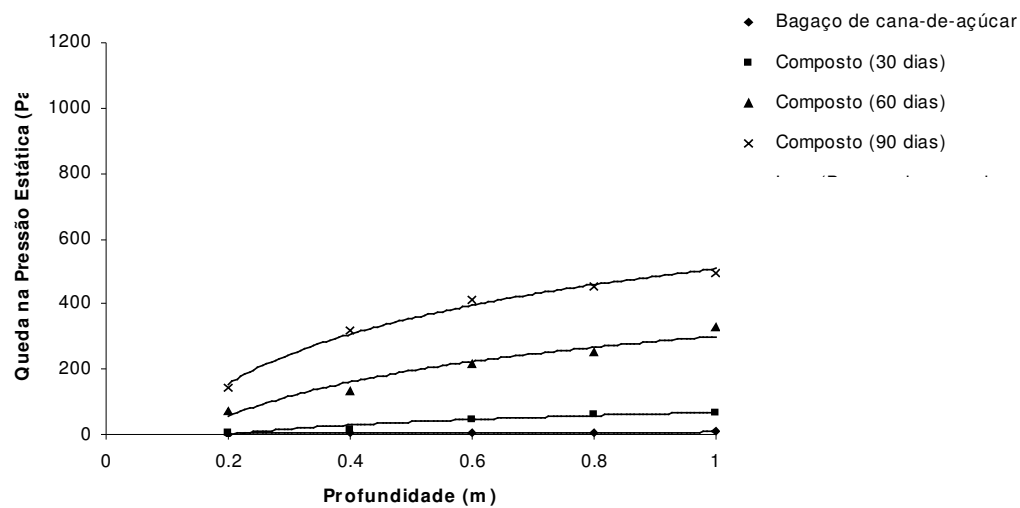


Figura 3. Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material, para a abertura do diafragma de 3,0 cm.

Quadro 4. Equação ajustada para variação da 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 ²
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

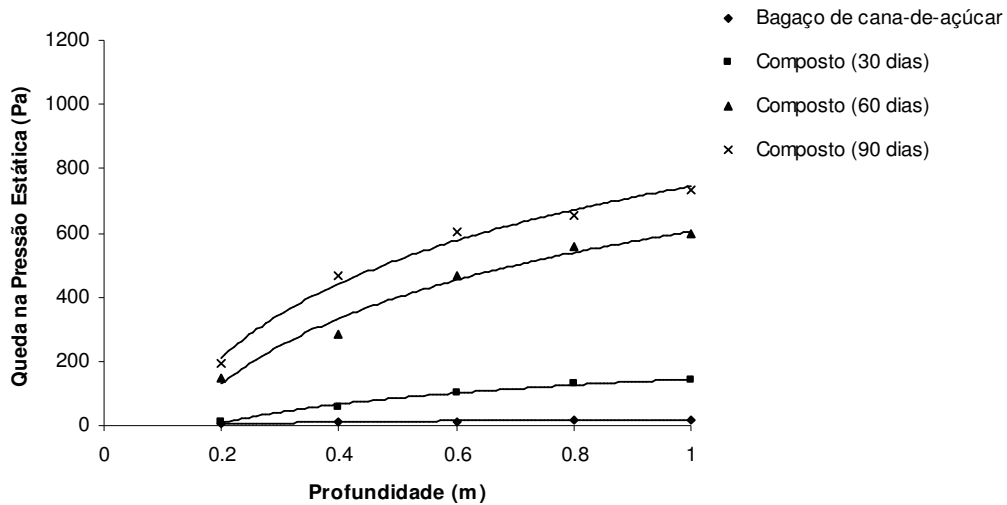


Figura 4. Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação pressão da estática do ar insuflado em uma coluna de material para a abertura do diafragma de 4,5 cm.

Quadro 5. Equação ajustada para variação da 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 ²
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

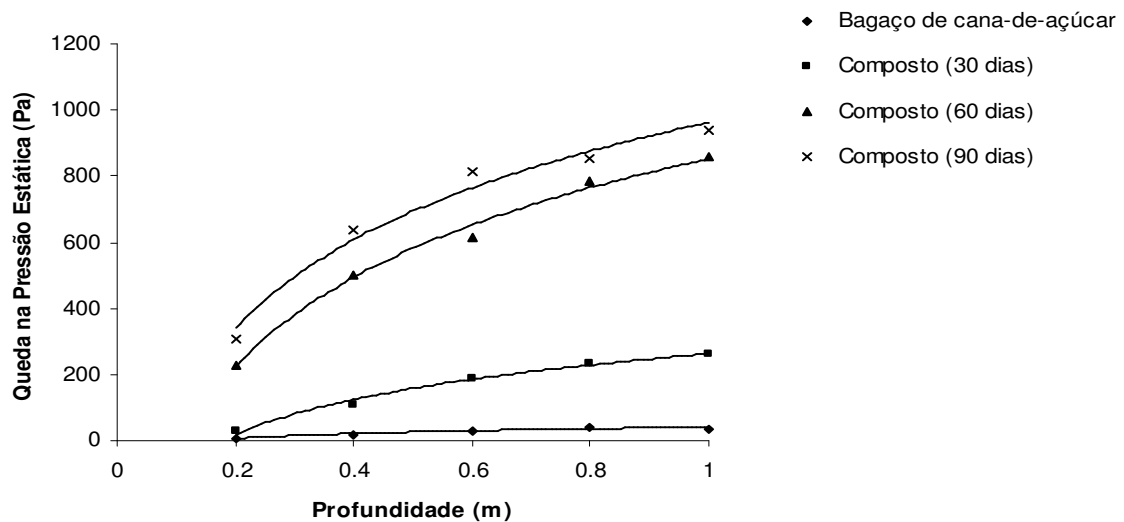


Figura 5. Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material para a abertura do diafragma de 6,0 cm.

Quadro 6. Equação ajustada para variação da 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 ²
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

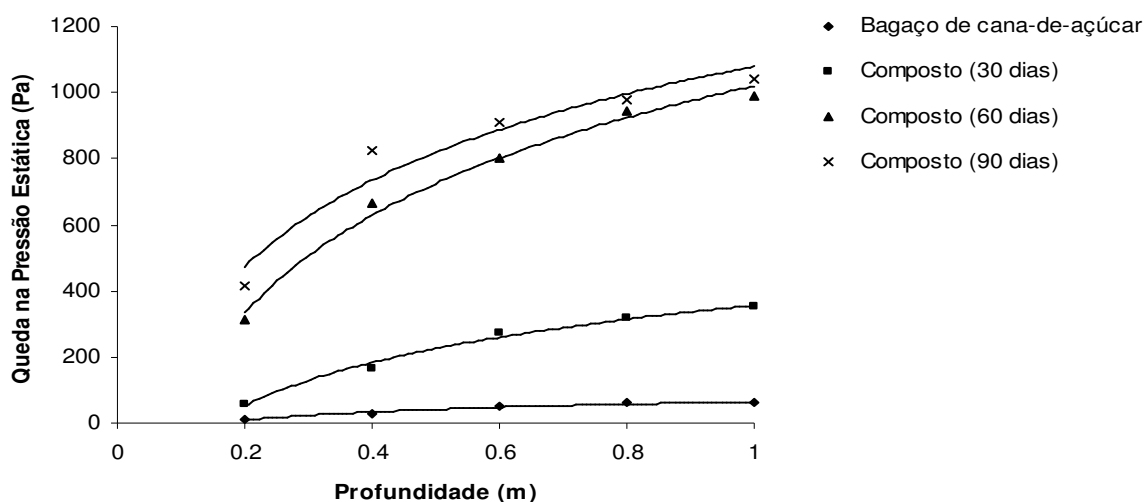


Figura 6. Efeitos da altura da camada e tempo de degradação bioquímica do material em compostagem sobre a variação da pressão estática do ar insuflado em uma coluna de material para a abertura do diafragma de 7,5 cm.

Quadro 7. Equação ajustada para variação da 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 ²
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 a 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 que no material que sofreu degradação bioquímica por 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 ao ser 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. Neste trabalho, tal comportamento não foi observado, tendo as curvas apresentado 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 esse comportamento possa estar associado à secagem do material em avaliação, tendo em vista que com a sua secagem pode estar havendo desentumescimento das partículas e, com isso, a 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 pode ser considerada adequada para 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 apresentado no 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. Utilizando-se a Equação 2, para cálculo da potência necessária do conjunto moto-ventilador, com eficiência considerada como sendo 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 W t^{-1} , para 1,0 m de altura de pilha, e 361 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 neste experimento, 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, por essa razão a altura da pilha de material deverá ser tal 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.