

Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica

Nara Cristina Lima Silva, Antonio Teixeira de Matos*, Márcia Aparecida Sartori, Débora Astoni Moreira, Renata Tâmara Pereira de Barros e Fátima Aparecida Rezende Luiz

Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Av. Ph Rolfs, s/n, 36570-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: atmatos@ufv.br

RESUMO. Pouco se sabe sobre as necessidades de potência do ventilador, com o tempo, na na compostagem do material em leiras estáticas aeradas. Objetivou-se, com a realização deste trabalho, ajustar curvas de variação na pressão estática do ar, quando forçado em pilhas de material orgânico em diferentes estádios de degradação bioquímica. Para a condução do mesmo, montou-se uma pilha de compostagem com bagaço de cana-de-açúcar (BC) e cama de frango (CF), 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 e a cada cinco dias, nos dois meses posteriores. No BC, nas condições tal como foi utilizado na mistura, e no material da mistura BC + CF, nas condições em que se encontravam após 30, 60 e 90 dias de compostagem, foi medida a perda de carga, em 1 m de altura de coluna. Quanto maior a vazão específica de ar e o tempo de degradação bioquímica do material, maior foi o decréscimo na pressão estática do ar nele insuflado. O modelo de Shedd se ajustou bem aos dados experimentais, na faixa de vazão específica de ar investigada, podendo ser usado para prever os gradientes de pressão estática no composto orgânico.

Palavras-chave: compostagem, leiras estáticas aeradas, aeração.

ABSTRACT. Variation in the static pressure of insufflated air under different specific flow rates in columns of organic material at distinct biochemical stages.

Little is known about the power requirements of the exhaust fan throughout the composting period of a forced aeration systems. This study was conducted in order to adjust the variation curves for static air pressure, when forced into piles of organic material at different biochemical degradation stages. To that end, a composting pile with both sugarcane bagasse (BC) and poultry litter (CF) was stacked, by preparing the mixture in such a way as to obtain an initial C/N ratio of 30/1. The material was revolved every three days during the first month, followed by revolutions at regular 5-day intervals for two more months. Load loss was measured at 1m column height for the BC under the same conditions used in the mixture, as well as in the BC + CF mixture under the conditions at 30, 60 and 90 days of composting. The higher the specific air flow and the biochemical degradation time of the material under composting, the higher the decrease in the static pressure of the air insufflated in it. The Shedd model was well adjusted to the experimental data in the air specific flow range under investigation, and can be used to predict the static pressure gradients in organic compost.

Key words: composting, aerated static piles, aeration.

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, sendo alternativa de baixo custo e ambientalmente saudável para estabilização de biossólidos (Metcalf e Eddy, 2003). Os principais fatores que controlam o processo de compostagem são a quantidade e a natureza dos microrganismos, a

umidade, a aeração, a temperatura e a relação carbono nitrogênio (C/N) (Kiehl, 2001).

A 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, tempo que deve ser seguido por um período de cura do material, sem aeração forçada, por 30 ou mais dias (Metcalf e Eddy, 2003). Tipicamente, as pilhas são de 2 a 2,5 m de altura.

O processo de compostagem sob aeração forçada apresenta várias vantagens, se comparado ao processo Windrow de compostagem: é um processo que demanda praticamente a metade da área; demanda menos de mão-de-obra; pode ser executado em qualquer condição climática, já que dispõe de aeradores estáticos, e não depende de equipamento para reviramento do material em compostagem (pás-carregadoras ou pessoal).

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 por camada de material pelo qual foi forçado a passar (Afonso, 1994).

As relações entre o volume de ar que atravessa a massa do produto, a resistência oferecida à passagem do ar e a altura da camada de material são importantes na seleção e operação de equipamentos de movimentação de ar (Biaggioni *et al.*, 2005). Considerando-se que os custos de aquisição e operação do ventilador estão diretamente associados à sua potência, torna-se importante o estudo das variações que influenciam a demanda de potência pelo equipamento.

O cálculo da potência do ventilador é função da vazão do 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).

Quando o ar é forçado por meio de uma camada de produtos agrícolas, a resistência ao fluxo, denominada de queda de pressão, desenvolve-se como resultado da perda de energia por causa da fricção e da turbulência do ar. A queda de pressão com a passagem do ar por qualquer produto, depende da vazão específica, da superfície e forma características do produto, do número, tamanho e configuração dos vazios, da variabilidade do tamanho de partícula e da profundidade da coluna de produto (Brooker *et al.*, 1974). Os dados de queda de pressão, em produtos agrícolas, são empíricos e usualmente apresentáveis como curvas logarítmicas (Shedd, 1953; Brooker *et al.*, 1974; Lasseran, 1981).

Apesar de se saber que diferentes fatores podem influenciar na perda de carga do ar insuflado numa massa de material, tais como método de enchimento e quantidade e tamanho de material estranho presente no meio da massa, apenas o efeito da profundidade da massa de grãos pode ser quantificado acuradamente, sendo a curva de Shedd geralmente aceita para associar essas variáveis no projeto de silos e secadores de grãos. Em razão da convexidade das curvas, Shedd (1953) recomendou o uso do seguinte modelo para pequenas faixas de fluxos de ar:

$$Q_a = a\Delta P^b \quad (1)$$

em que,

Q_a - vazão específica de ar ($L^3 T^{-1} L^{-2}$);

ΔP - queda de pressão estática por metro de altura de coluna de material ($M T^{-2} L^{-2}$); e

a, b - constantes obtidas no ajuste dos dados experimentais.

Brooker *et al.* (1974) citam que Hukkil e Shedd, utilizando os dados de Shedd, obtidos para 22 diferentes tipos de grãos, ajustaram um modelo único, capaz de descrever, matematicamente, a queda de pressão como função da vazão específica de ar:

$$\Delta P = \frac{aQ_a^2}{\ln(1+bQ_a)} \quad (2)$$

Pouco se sabe sobre a queda de pressão estática no ar forçado em pilhas de material orgânico em compostagem, notadamente no que se refere à influência do estágio de degradação bioquímica do material, o que pode ser um fator de importância a ser considerado no cálculo da potência demandada pelo ventilador a ser utilizado em sistemas de compostagem com ventilação forçada.

Objetivou-se, com a realização deste trabalho, ajustar curvas de queda na pressão estática do ar, quando forçado em pilhas de material orgânico, em diferentes estágios de degradação bioquímica.

Material e métodos

O experimento foi realizado no Setor de Armazenamento, Departamento de Engenharia Agrícola – UFV, Viçosa, Estado de Minas Gerais. Para a condução do mesmo, montou-se uma pilha de compostagem com bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, preparando 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 cinco dias, por mais dois meses. No bagaço de cana-de-açúcar, nas condições tais como foi utilizado na mistura, e no material da 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, em 1 m de altura de coluna.

Para medição da perda de carga, utilizou-se estrutura apresentada tal como apresentada no esquema ilustrado na Figura 1, 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 1.710 rpm; (8) diafragma fixo à entrada de ar, para possibilitar a variação na vazão.

Mediu-se a pressão estática no ar na câmara plenum, utilizando-se um manômetro diferencial inclinado.

O enchimento da coluna de chapa galvanizada foi realizado, colocando-se o material de 0,20 em 0,20 m, até ser completado 1 m, sendo realizadas as medidas de pressão estática na posição vertical de 1 m.

As medições de queda na pressão estática do ar forçado nas pilhas de material foram realizadas com três repetições, para cada estágio de maturação do material em compostagem, utilizando-se as vazões de ar apresentadas na Tabela 1, que foram proporcionadas pelas aberturas de 1,5; 3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 cm do diâgrama.

O modelo empírico testado neste trabalho foi o proposto por Shedd (1953). Assim, os dados de gradiente de pressão e vazão específica de ar, obtidos experimentalmente, foram utilizados para que fosse ajustado, por meio de análises de regressão simples, o referido modelo, determinando-se os parâmetros *a* e *b* da Equação 1. Para ajuste das equações foi utilizado o programa Origin 6.0 da Microcal (1999).

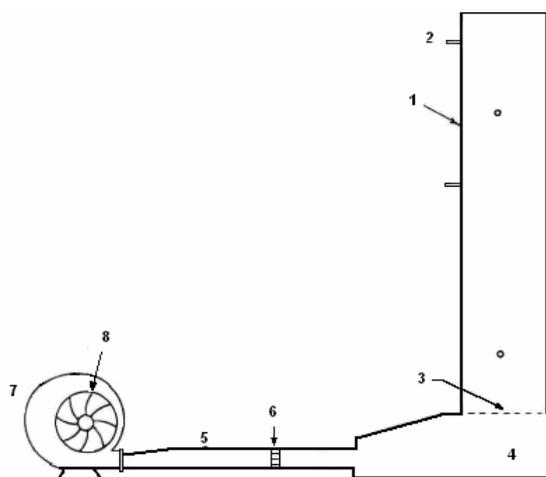


Figura 1. Esquema de protótipo utilizado na determinação do gradiente de pressão estática em diferentes vazões específicas de ar.

Tabela 1. Vazão de ar em função da altura do material em compostagem para diferentes vazões.

Abertura do diafragma (cm)	Altura (m)	Vazão de ar ($m^3 s^{-1}$)			
		Bagaço de cana-de-açúcar	Composto (30 dias)	Composto (60 dias)	Composto (90 dias)
1,5 cm	1,0	0,0423	0,0562	0,0672	0,0044
3,0 cm	1,0	0,077762	0,084143	0,102021	0,006343
4,5 cm	1,0	0,123223	0,153929	0,156056	0,01443
6,0 cm	1,0	0,16988	0,188756	0,18304	0,021407
7,5 cm	1,0	0,1962	-	0,387315	0,024525

Resultados e discussão

O teor de água, base seca, massa fresca e massa específica do bagaço de cana-de-açúcar, cama de frango e material em compostagem, com 30, 60 e 90 dias de degradação bioquímica, estão apresentados na Tabela 2.

Conforme pode ser verificado, o material apresentou massa específica crescente com o tempo de sua degradação bioquímica, embora os valores obtidos para massa específica do material úmido, aos 60 dias, tenha ficado menor que o obtido aos 30 dias de compostagem, o que ocorreu em decorrência do maior teor de água no material amostrado neste período. Os valores obtidos podem ser considerados baixos, tendo em vista que segundo Kiehl (1998), a matéria orgânica seca deve apresentar massa específica entre 400 e 600 $kg m^{-3}$ e o material deve apresentar massa específica entre 550 e 700 $kg m^{-3}$. Os baixos valores obtidos podem ser decorrentes da utilização de bagaço de cana-de-açúcar na composição da mistura a ser compostada, haja vista que, conforme está apresentado na Tabela 2, esse material apresenta baixa massa específica.

Tabela 2. Teor de água (b.s), massa fresca e massa específica dos materiais avaliados na coluna.

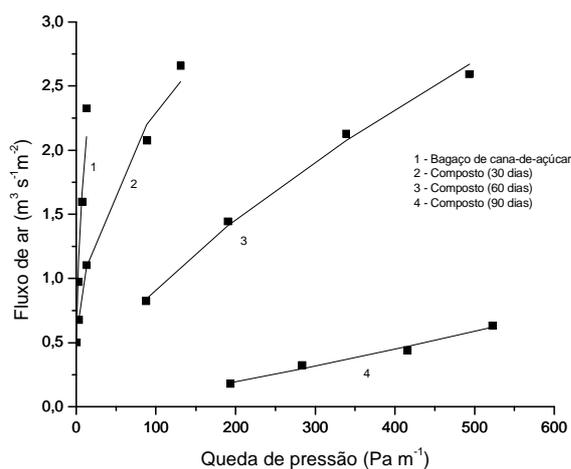
Material	Teor de água (b.s) (dag kg ⁻¹)	Massa fresca (kg)	Massa específica (kg m ⁻³)
Bagaço de cana-de-açúcar	8,03	4,3	56*/61**
Cama de frango	42,48	28,5	283/403
Composto (30 dias)	82,50	27,8	215/393
Composto (60 dias)	78,55	27,3	216/386
Composto (90 dias)	68,66	30,0	252/424

* massa específica obtida com o produto seco e ** massa específica obtida com o produto úmido

O aumento na massa específica do material, com o tempo de degradação bioquímica, é resultante da diminuição no tamanho das partículas, em decorrência da referida decomposição microbiana do material.

Na Figura 2, pode-se verificar a variação no gradiente de pressão estática na pilha de material em compostagem, em função de diferentes vazões específicas de ar. Em todas as curvas, foi verificado o mesmo comportamento do modelo empírico de Shedd, quando ajustado para a queda na pressão estática em grãos.

Houve aumento na perda de pressão estática do ar com o tempo de maturação do material, no entanto verificou-se, para a mesma vazão específica de ar, maior decréscimo na pressão estática pela passagem do ar no material em compostagem, com 90 dias de maturação. Isso se deve ao já citado aumento na massa específica do material. O aumento, na massa específica ocorre em consequência na diminuição na granulometria do material e, com isso, maior resistência à passagem do ar forçado na pilha de material.

**Figura 2.** Curvas de vazão específica do ar como função da queda de pressão estática do ar forçado a passar na coluna de material em compostagem, em diferentes estádios de degradação bioquímica, obtidos experimentalmente e estimados, utilizando-se o modelo de Shedd (1953).

As equações ajustadas aos dados obtidos

experimentalmente estão mostradas na Tabela 3, com ajuste da equação de Shedd. Pode-se verificar, pelos valores dos coeficientes de determinação obtidos, próximos de 1, que foi obtido bom ajuste do referido modelo aos dados, indicando que a descrição matemática do fenômeno está adequada.

Explicitando-se a queda na pressão estática do ar, ou seja, obtendo-se equações em que Q é a variável independente e ΔP a variável dependente, conforme sugerido por Brooker et al. (1974), obtêm-se bons ajustes para o material (bagaço de cana-de-açúcar) fresco e para a mistura submetida a 30 e 60 dias de degradação bioquímica (Tabela 4). Porém, não foi possível obter bom ajuste do modelo, quando o material já se encontrava com 90 dias de degradação bioquímica. Neste caso, melhor ajuste foi obtido para o modelo logarítmico, indicando decréscimo na razão de aumento na queda de pressão em relação ao aumento na vazão específica do ar. Especula-se que essa diminuição se deva ao desentumescimento do material com o aumento da vazão específica, para proporcionar aumento dos espaços vazios (porosidade intersticial) do material.

Tabela 3. Equação de Shedd e coeficientes de determinação obtidos para o bagaço de cana-de-açúcar e material em compostagem, com 30, 60 e 90 dias de degradação bioquímica, estando Q_a expresso em m³ s⁻¹ m⁻² e ΔP em Pa m⁻¹.

Material	a	b	Equação	R ²
Bagaço de cana-de-açúcar	0,727	0,412	$Q_a = 0,727 \cdot \Delta P^{0,412}$	0,978
Composto (30 dias)	0,429	0,364	$Q_a = 0,429 \cdot \Delta P^{0,364}$	0,995
Composto (60 dias)	0,042	0,670	$Q_a = 0,042 \cdot \Delta P^{0,670}$	0,997
Composto (90 dias)	$3,18 \times 10^{-4}$	1,210	$Q_a = 3,18 \times 10^{-8} \cdot \Delta P^{1,210}$	0,983

Tabela 4. Equação de Brooker et al. (1974) e coeficientes de determinação obtidos para o bagaço de cana-de-açúcar e material em compostagem com 0, 30 e 60 dias e ajuste da equação logarítmica para 90 dias de degradação bioquímica do material orgânico, estando Q_a expresso em m³ s⁻¹ m⁻² e ΔP em Pa m⁻¹.

Material	a	b	Equação	R ²
Bagaço de cana-de-açúcar	9,876	22,939	$\Delta P = \frac{9,876 \cdot Q_a^2}{\ln(1 + 22,939 \cdot Q_a)}$	0,992
Composto (30 dias)	135,68	546,104	$\Delta P = \frac{135,68 Q_a^2}{\ln(1 + 546,104 Q_a)}$	0,978
Composto (60 dias)	185,76	4,646	$\Delta P = \frac{185,769 \cdot Q_a^2}{\ln(1 + 4,646 \cdot Q_a)}$	0,997
Composto (90 dias)			$\Delta P = 119,03 \cdot \ln Q_a + 604,66$	0,972

Com base no comportamento dos dados experimentais obtidos, pode-se verificar que, à medida que foi aumentada a vazão específica de ar insuflado na camada de material, aumentou a queda na pressão estática do ar. Além disso, percebe-se que o tempo de degradação bioquímica do material em

compostagem tem importante influência na queda de pressão estática do ar. Enquanto que, no bagaço de cana-de-açúcar fresco, a queda na pressão estática é desprezível, quando esse material fica sujeito à degradação bioquímica por período de 90 dias, a queda na pressão estática passa a ser maior, alcançando valores superiores a 500 Pa m^{-1} para vazões específicas de ar relativamente baixas tais como $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

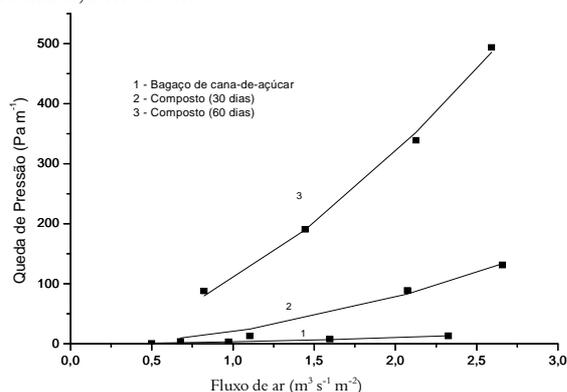


Figura 3. Curvas de queda de pressão estática do ar como função da vazão específica do ar forçado a passar na coluna de material em compostagem, em diferentes estádios de degradação bioquímica, obtidos experimentalmente e estimadas, utilizando-se o modelo de Shedd (1953).

Quando comparados os valores de queda de pressão observada no bagaço de cana-de-açúcar sem mistura com a cama de frango e o obtido na mistura, aos 30 dias, verifica-se que também a entrada de material fino (cama de frango) pode ter sido fator de aumento da resistência ao fluxo do ar na coluna de material. Segundo Brooker *et al.* (1974), quando a porcentagem de material fino (impurezas) aumenta no meio de grãos, a resistência ao fluxo aumenta, o que, no caso de grãos de milho, pode atingir um máximo quando o material fino estiver presente numa proporção de 30 a 40% do produto. Neste caso, a queda de pressão na coluna de grãos de milho pode chegar a ser o dobro da obtida em produto isento de impurezas. Neste experimento, a proporção de cama de frango, visando-se obter uma relação C/N de 30:1 foi de 38%, o que proporcionou diminuição do espaço macroporoso, aumentando, por consequência, a resistência ao deslocamento do ar na coluna.

O efeito da umidade do produto, na resistência ao fluxo de ar, não está claro. Em alguns produtos, há aumento na queda de pressão, com o aumento da umidade do produto.

Brooker *et al.* (1974) apresentaram equação de estimativa da queda de pressão estática no ar ao ser forçado em colunas de grãos de milho, cuja equação

ajustada para uso das mesmas unidades utilizadas neste trabalho, é: $\Delta P = \frac{65,216.Q_a^2}{\ln(1 + 30,709.Q_a)}$.

Como são poucas as informações disponíveis de queda na pressão estática do ar, em materiais que não sejam granulares e de pequena macroporosidade, as equações obtidas, neste trabalho, também foram comparadas às equações obtidas em coluna de bulbos de cebola (Migliari *et al.*, s.d), sendo as equações ajustadas para utilização das mesmas unidades utilizadas neste trabalho:

$$Q_a = 0,0409.\Delta P^{0,4183} \text{ e } \Delta P = \frac{507,24.Q_a^2}{\ln(1 + 3118,8.Q_a)}$$

Avaliando-se os parâmetros ajustados, verifica-se que, em ambas as equações os valores dos parâmetros ajustados estão mais próximos aos que foram obtidos no material, com 30 e 60 dias de degradação bioquímica.

Conclusão

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que quanto maior a vazão específica de ar e o tempo de degradação bioquímica do material em compostagem, maior a queda na pressão estática do ar nele insuflado; o modelo de Shedd ajustou-se bem aos dados experimentais na faixa de vazão específica de ar investigada, podendo ser usado para prever os gradientes de pressão estática no composto orgânico. O modelo apresentado por Brooker *et al.* (1974) só não se ajustou adequadamente aos dados obtidos no material com 90 dias de degradação bioquímica.

Referências

- AFONSO, A.D.L. *Gradiente de pressão estática em camadas de frutos de café (Coffea arabica L.) com diferentes teores de umidade*. 1994. Dissertação (Mestrado em Armazenamento)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 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. Dissertação (Mestrado em Armazenamento)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.
- BIAGGIONI, M.A.M. *et al.* Queda de pressão estática por meio de uma coluna de noz macadâmia. *Eng. Agric.*, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 499-507, 2005.
- BROOKER, D.B. *et al.* *Drying cereal grains*. Westport: AVI Publ., 1974.
- KIEHL, E.J. *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*. Piracicaba: Editora do Autor, 1998.
- KIEHL, J.C. *Produção de composto orgânico e*

vermicomposto. *Inf. Agropecu.*, Belo Horizonte, v. 22, n. 212, p. 40-52, 2001.

LASSERAN, J.C. *Aeração de grãos*. Viçosa: Centreinar, 1981. (Série Centreinar, n. 2)

METCALF & EDDY. *Wastewater engineering: treatment and reuse*. New York: Mc Graw Hill, 2003.

MICROCAL ORIGIN: version 6.0. Northampton: Microcal Software, 1999. 1 CD-ROM.

MIGLIARI, M.I.X. et al. *Resistência oferecida por uma camada de cebola (Allium cepa L.) ao fluxo de ar*. Viçosa: Centreinar, s.d. (Mimeografado).

PINTO, M.T. Higienização de lodos. In: ANDREOLI, C.V. et al. (Ed.). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final*. Belo Horizonte: UFMG: Sanepar, 2001. p. 261-317.

SHEDD, C.K. Resistance of grains and seeds to air flow. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 34, n. 9, p. 616-619, 1953.

Received on October 23, 2006.

Accepted on September 14, 2007.