

DENIS LEOCÁDIO TEIXEIRA

**DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR  
PARA SISTEMAS DE COMPOSTAGEM POR AERAÇÃO FORÇADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T266d  
2014  
Teixeira, Denis Leocádio, 1989-  
Determinação do gradiente de pressão estática do ar para  
sistemas de compostagem por aeração forçada / Denis Leocádio  
Teixeira. – Viçosa, MG, 2014.  
xi, 54f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Antonio Teixeira de Matos.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.60-65.

1. Resíduos orgânicos. 2. Compostos orgânicos.  
3. Equações. 4. Tratamento aeróbio. 5. Leiras estáticas aeradas.  
6. Demanda de potência. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.86

DENIS LEOCÁDIO TEIXEIRA

**DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR  
PARA SISTEMAS DE COMPOSTAGEM POR AERAÇÃO FORÇADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 18 de julho de 2014.

---

Prof. Alisson Carraro Borges

---

Prof<sup>a</sup>. Mônica de Abreu Azevedo

---

Prof. Antonio Teixeira de Matos  
Orientador

*“Há mais pessoas que desistem, do que pessoas que fracassam!”*

*(Henry Ford)*

A minha Mãe, pelo incentivo aos estudos quando eu era criança.

Ao meu Pai, pelas palavras de incentivo e confiança.

As minhas irmãs, pelo apoio e amizade.

**DEDICO**

Ao amor da minha vida *Delilah*

**OFEREÇO**

iii

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, saúde e paz.

Ao professor Antonio Teixeira de Matos, pela oportunidade, orientação e amizade.

Ao meu Coorientador, professor Evandro de Castro Melo, pelas sugestões e esclarecimentos.

Aos membros da banca, professores Alisson Carraro Borges e Mônica de Abreu Azevedo, pelas sugestões e indagações apresentadas para enriquecimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade e condições oferecidas para realização deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

À minha namorada Delilah, pelo amor, amizade, apoio, incentivo e principalmente pela paciência nos momentos de difíceis.

Ao aluno de doutorado Diogo Coelho, pela valiosa contribuição e amizade.

Ao Simão, pelos ensinamentos e pelo apoio nos trabalhos de laboratório.

Aos amigos e colegas do GPQA, especialmente, Isabela, Suymara e Edson, pela convivência, amizade e apoio.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, Marcelo, José Antônio, Chicão e José Galinare, pela colaboração para o trabalho experimental.

Aos professores conselheiros, Adílio, Juarez, Jadir, Cecon e Marcio Arêdes, pelas críticas e sugestões que só somaram para o sucesso deste trabalho.

A todos meus familiares, pelo incentivo e torcida.

Às demais pessoas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

## **BIOGRAFIA**

Denis Leocádio Teixeira, filho de Antônio Gomes Teixeira e Elvira de Oliveira Leocádio, nasceu em 20 de junho de 1989, em São Miguel do Anta, MG.

Nesta mesma cidade, concluiu o ensino fundamental na Escola Municipal Juarez de Souza Carmo, e o ensino médio na Escola Estadual Pedro Lessa.

Em Março de 2007, iniciou o curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em novembro de 2012.

Em dezembro de 2012, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na Área de Recursos Hídricos e Ambientais, concluindo o curso em julho de 2014.

Em agosto de 2014, ingressou no curso de Doutorado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na Área de Recursos Hídricos e Ambientais.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1. COMPOSTAGEM .....	4
2.1.1. Principais fatores que influenciam no processo .....	5
2.2. MÉTODOS DE COMPOSTAGEM .....	7
2.2.1. Sistema “Windrow” .....	7
2.2.2. Leiras Estáticas Aeradas.....	8
2.2.3. Sistema “In-vessel” .....	9
2.3. TAXAS DE AERAÇÃO NA COMPOSTAGEM .....	10
2.4. GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR FORÇADO EM CAMADAS DE MATERIAL ORGÂNICO .....	11
2.5. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE AERAÇÃO NA COMPOSTAGEM .....	15
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	18
3.2. DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR .....	21
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>27</b>
4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO MATERIAL .....	27
4.2. QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR EM CAMADAS DE MATERIAL ORGÂNICO .....	31
4.3. INFLUÊNCIA DA COMPOSTAGEM NO GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR.....	36
4.4. INFLUÊNCIA DA CAMA DE FRANGO NO GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR .....	40
4.5. DEMANDA DE POTÊNCIA DOS VENTILADORES .....	46
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>48</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Relação C/N e concentração de sólidos voláteis no material antes e depois do processo de compostagem.....	28
TABELA 2. Média e desvio padrão da temperatura e umidade relativa do ar ambiente monitoradas para cada material orgânico.....	34
TABELA 3. Massa específica e conteúdo de água (base úmida) do material proveniente das misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café.....	36
TABELA 4. Massa específica e conteúdo de água (base úmida) nas misturas de materiais orgânicos, antes e depois de terem sido submetidas ao processo de compostagem.....	38
TABELA 5. Equações ajustadas para estimativa da queda na pressão estática do ar (kPa), em função da espessura da camada de material (m), antes de ser submetido à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).....	41
TABELA 6. Equações ajustadas para estimativa da queda na pressão estática do ar (kPa), em função da espessura da camada de material (m), depois de ter sido submetido à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).....	42
TABELA 7. Parâmetros obtidos no ajuste do gradiente de pressão estática ( $\text{kPa m}^{-1}$ ) e vazão específica do ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) aos modelos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter, para as misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café, antes e depois de terem sido submetidos à compostagem.	48
TABELA 8. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados (A, B) para o modelo de Shedd, ajustado aos dados de gradiente de pressão estática ( $\text{kPa m}^{-1}$ ) em função da vazão específica de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).....	52
TABELA 9. Demanda de potência do ventilador para aeração do material antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem.....	55

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Obtenção do ponto de trabalho do ventilador.....	24
FIGURA 2.	Vista da leira A (bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango) e leira B (palha de café e cama de frango) no início do processo de compostagem.	28
FIGURA 3.	Avaliação visual das alterações proporcionadas pelas misturas de cama de frango, em proporções de 0; 10; 20; 30 e 40%, respectivamente, em relação ao bagaço de cana-de-açúcar picado (A), serragem de madeira (B) e palha de café (C).....	29
FIGURA 4.	Protótipo utilizado na medição da queda de pressão estática do ar insuflado em camadas de diferentes misturas de materiais orgânicos.....	30
FIGURA 5.	Vistas dos componentes constituintes do Protótipo para Medição da Queda de Pressão Estática do Ar: (A) – coluna de chapa galvanizada; (B) – tomadas para medição da pressão estática; (C) – piso perfurado; (D) – câmara <i>plenum</i> ; (E) – tubo de PVC; (F) – ventilador centrífugo e (G) – diafragma.....	31
FIGURA 6.	Acabamento do Protótipo para Medição da Queda de Pressão Estática do Ar: (A) – calafetagem das uniões; (B) – verificação de vazamentos; (C) – colagem da borracha no encaixe.....	32
FIGURA 7.	Perfil para identificação dos pontos de medição da velocidade do ar.....	33
FIGURA 8.	Queda na pressão estática do ar em função da espessura da camada de cama de frango misturada com bagaço de cana-de-açúcar (A); serragem de madeira (B) ou palha de café (C), antes de serem submetidas à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\dot{Q}_a$ ).....	40
FIGURA 9.	Queda na pressão estática do ar em função da espessura da camada de cama de frango misturada com bagaço de cana-de-açúcar (A) ou palha de café (B), depois de terem sido submetidas à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\dot{Q}_a$ ).....	42
FIGURA 10.	Formação de placas para o bagaço de cana-de-açúcar quando empilhado.	44

- FIGURA 11. Gradiente de pressão estática do ar em camadas de cama de frango misturada com bagaço de cana-de-açúcar (A) ou palha de café (B), antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, em função da vazão específica de ar..... 45
- FIGURA 12. Formação de aglomerados granulares na mistura de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar (A) ou palha de café (B), depois de ter sido submetido ao processo de compostagem..... 46
- FIGURA 13. Gradiente de pressão estática do ar em camadas de cama de frango, em diferentes proporções, com bagaço de cana-de-açúcar (A); serragem de madeira (B) ou palha de café (C), em função da vazão específica de ar.... 49

## RESUMO

TEIXEIRA, Denis Leocádio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2014. **Determinação do gradiente de pressão estática do ar para sistemas de compostagem por aeração forçada.** Orientador: Antonio Teixeira de Matos. Coorientador: Evandro de Castro Melo.

Embora existam, na literatura científica, equações e gráficos para estimativa do gradiente de pressão estática do ar, quando forçado em camadas de grãos e sementes, são poucos os trabalhos realizados utilizando-se resíduos orgânicos submetidos ao tratamento por compostagem. Neste trabalho, teve-se por objetivo o ajuste de equações que possibilitassem a estimativa do gradiente de pressão estática do ar, quando insuflado em camadas de diferentes materiais orgânicos. Os resíduos utilizados foram a cama de frango e, como agentes estruturantes e fonte de carbono, o bagaço de cana-de-açúcar, a serragem de madeira e a palha de café, os quais foram misturados nas proporções de 0; 10; 20; 30 e 40% (base volumétrica) de cama de frango em relação aos agentes estruturantes, além de misturas com relação C/N de 25/1, as quais foram submetidas ao tratamento por compostagem. As medições da queda de pressão estática do ar, ao atravessar camadas de material orgânico, antes e depois de ter sido submetido ao tratamento por compostagem, e nas camadas de materiais provenientes das diferentes proporções de cama de frango adicionada aos agentes estruturantes, foram realizadas utilizando-se um protótipo, no qual o material foi submetido a vazões específicas de ar que variaram de 0,02 a 0,13 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. A queda na pressão estática do ar aumentou de forma potencial com a espessura da camada de material. No que se refere ao decurso do processo de compostagem, este contribuiu para redução do gradiente de pressão estática do ar ao atravessar as camadas de material orgânico. Os modelos matemáticos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter podem ser utilizados para prever o gradiente de pressão estática do ar, ao ser insuflado em camadas de resíduos orgânicos, no entanto, o modelo de Shedd pode ser considerado, em termos estatísticos, o que melhor representou o fenômeno em estudo. Menores valores de gradientes de pressão estática do ar foram obtidos em camadas sem adição de cama de frango e os maiores obtidos nas camadas constituídas pela mistura com cama de frango na proporção de 40%. As equações obtidas para estimativa do gradiente de pressão estática do ar, para as diferentes proporções de cama de frango, podem ser agrupadas, originando modelos capazes de explicar a variação do gradiente de pressão para cada agente estruturante e fonte de carbono.

## ABSTRACT

TEIXEIRA, Denis Leocádio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2014. **Determination of static pressure gradient of air for composting system by forced aeration.** Adviser: Antonio Teixeira de Matos. Co-adviser: Evandro de Castro Melo.

Although there equations and graphics in scientific literature to estimate the static pressure gradient of airflow through layers of grains and seeds, studies using organic waste submitted to composting treatment are scarce. The objective of this study was to adjust equations to estimate the static pressure gradient of airflow through layers of different organic residues. The waste used were chicken litter and as bulking agents and carbon source: sugarcane bagasse, sawdust and coffee husk which were mixed in the ratio of 0; 10; 20; 30 e 40% (volumetric basis), of chicken litter in relation to bulking agents, as well as mixture with C/N ratio of 25/1, which were submitted to composting process. Measurements of static pressure drop in layers of organic waste before and after the composting process, and in layers of material from the different proportions of chicken litter added to bulking agents, were performed using a prototype with specific airflow rates ranging from 0.02 to 0.13 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. The static pressure drop of airflow increased as a power of the material layer thickness. Static pressure gradient in layers of organic waste decrease with the composting process. Shedd, Hukill & Ives and Hunter models may be used to predict the static pressure gradient of air to be blown through the organic residues layers, however, the Shedd model was that which best represented the phenomenon studied. Lower values of static pressure gradient were obtained in layers without chicken litter and the higher values obtained in layers composed of mixture of chicken litter in proportion of 40%. Equations to estimate the static pressure gradient for different proportions of chicken litter may be clustered, yielding models that can explain the variation of pressure gradient for each bulking agent and carbon source.

# 1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos orgânicos, principalmente no setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas, vem crescendo no Brasil. Segundo relatório do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) estima-se que, no ano de 2009, a geração de resíduos oriundos das agroindústrias associadas à agricultura foi de 291 milhões de toneladas. No que se refere a dejetos gerados na atividade pecuária, os valores são da ordem de 1,7 bilhão de toneladas, enquanto o setor florestal foi responsável por gerar, aproximadamente, 85 milhões de metros cúbicos de resíduos.

De acordo com o estabelecido na Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, a destinação final ambientalmente adequada dos resíduos é uma exigência decorrente da necessidade de se evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando-se os impactos ambientais adversos.

Dentre as diversas formas de tratamento de resíduos sólidos orgânicos, a compostagem, que se caracteriza por um método de tratamento com a finalidade de aproveitamento agrícola desses resíduos na forma de composto orgânico, destaca-se como uma das alternativas mais adequadas.

A compostagem é um processo de degradação realizado por microrganismos aeróbios que apresenta duas fases de degradação, na primeira fase ocorrem às reações bioquímicas de oxidação mais intensas, predominantemente termofílicas e, na segunda, também denominada “fase de maturação”, ocorre o processo de humificação do material.

Dentre os diversos fatores que influenciam no processo de compostagem destacam-se a temperatura, o conteúdo de água, a relação C/N, o pH, e a disponibilidade de oxigênio (MATOS, 2014).

No Brasil, a compostagem vem sendo muito utilizada como forma de tratamento dos resíduos de agroindústrias, o que tem sido feito com resíduos de origem única ou com misturas, procurando-se obter relação C/N e porosidade mais adequada para eficiência do processo bioquímico de degradação.

Dentre os principais sistemas de compostagem, destacam-se o Processo por Reviramento ou Sistema “*Windrow*” e Processo por “Leiras Estáticas Aeradas”. No Processo *Windrow*, a oxigenação é realizada por meio de reviramentos periódicos do material em compostagem. No sistema por leiras estáticas aeradas, o ar é forçado por insuflação ou sucção na massa em compostagem, sendo a aeração realizada utilizando-se ventiladores. Neste

sistema não há revolvimento mecânico do material orgânico, no entanto o provimento de oxigênio é realizado de forma mais eficiente quando comparado com o sistema *Windrow*, aumentando a taxa de degradação bioquímica do material e, conseqüentemente, reduzindo o período de compostagem.

Na compostagem em leiras estáticas aeradas, os ventiladores são dimensionados visando atender a demanda bioquímica de oxigênio do material em compostagem além do controle da temperatura na faixa termofílica, sendo a vazão e a pressão estática do ar a serem fornecidas pelo ventilador, necessário para a correta seleção do mesmo. A pressão estática, deve ser suficiente para vencer a resistência ao seu escoamento através da camada de material em compostagem e o atrito com as paredes dos dutos e peças especiais do sistema de aeração. O gradiente de pressão estática do ar ao escoar através do material pode ser estimado, convencionalmente, com a utilização de modelos matemáticos ou gráficos que relacionam o gradiente de pressão estática com a vazão específica do ar. Os modelos utilizados são equações potenciais (Equação de Shedd), logarítmicas (Equação de Hukill & Ives) e quadráticas (Equação de Hunter) (McGUCKIN *et al.*, 1999; SILVA *et al.*, 2008; MATOS *et al.*, 2012).

Na literatura científica, encontram-se disponíveis equações para a estimativa do gradiente de pressão estática do ar quando forçado em camadas de grãos e sementes (ASAE, 2007), porém, são poucos os trabalhos realizados utilizando-se material orgânico em compostagem, além disso, nestes trabalhos foram realizadas misturas de materiais, não sendo caracterizada a proporção de cada um, o que dificulta sobremaneira a comparação e extrapolação dos resultados.

Considerando-se que os custos de aquisição e operação do ventilador estão diretamente relacionados à sua potência, e que esta é função da vazão de ar e da pressão estática a serem fornecidos, torna-se importante o conhecimento dos fatores que influenciam na demanda de potência do equipamento. Portanto, neste trabalho, teve-se por objetivo o ajuste de equações, que possibilitassem a estimativa do gradiente de pressão estática do ar, quando insuflado em camadas de materiais orgânicos. Teve-se ainda como objetivo:

- Avaliar a queda na pressão estática do ar ao longo da camada de material orgânico;
- Avaliar a influência do estágio de degradação bioquímica do material orgânico no gradiente de pressão estática do ar insuflado;

- Avaliar a influência da proporção de cama de frango adicionada ao bagaço de cana-de-açúcar picado, serragem de madeira e palha de café, no gradiente de pressão estática do ar insuflado em camadas constituídas por essas misturas homogêneas;
- Utilizar os modelos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter para descrever o gradiente de pressão estática do ar em função da vazão específica, quando insuflado em camadas de diferentes materiais orgânicos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. COMPOSTAGEM

A compostagem é uma prática conhecida e realizada pelos chineses a mais de 4.000 anos, tendo como objetivo, a reciclagem de nutrientes a partir da utilização do composto produzido como fertilizante (GRAY *et al.*, 1973 citados por COELHO, 2007). Trata-se de um processo aeróbio, por meio do qual se obtém a decomposição biológica controlada de resíduos orgânicos, o qual é constituído por duas fases distintas: na primeira fase ocorrem as reações bioquímicas de oxidação mais intensas, predominantemente termofílicas (temperatura na faixa de 45 a 65 °C), e na segunda, também denominada “fase de maturação”, ocorre o processo de humificação do material, obtendo-se, ao seu final, o composto orgânico propriamente dito (GOLUEKE, 1973; PEREIRA NETO *et al.*, 1986; MATOS *et al.*, 1998; NEGRO *et al.*, 1999; GRAVES, 2000). O composto humificado pode ser utilizado como fertilizante e condicionador de solos (COELHO *et al.*, 2011; LASHERMES *et al.*, 2012).

Os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são a temperatura, a taxa de aeração, o conteúdo de água, a composição química, a relação C/N, o pH, e a condutividade elétrica do material em decomposição (DIAZ *et al.*, 2002; GOMES, 2011; LI *et al.*, 2013).

Durante o processo de compostagem ocorrem mudanças físicas, químicas e biológicas no material orgânico, sendo consequência das reações bioquímicas realizadas pelos microrganismos presentes, os quais variam de acordo com a composição química do material em compostagem (LI *et al.*, 2013).

Determinados resíduos orgânicos devem ser misturados com outros materiais, tendo a função de agentes estruturantes, como também fonte de carbono para adequação da relação C/N a fim de se obter maior eficiência no processo de compostagem. Serragem de madeira, cascas de grãos e bagaços de frutas podem ser utilizados como agentes estruturantes e fonte de carbono, tendo como finalidade o ajuste na relação carbono/nitrogênio (C/N) e a formação de espaços porosos na massa em compostagem, o que proporciona aumento na disponibilidade de oxigênio no meio (YANG *et al.*, 2013). Segundo McGuckin *et al.* (1999), agentes estruturantes e fonte de carbono possuem outras funções tais como a de absorver o excesso de água de lodos provenientes do tratamento de esgotos, além de absorver gases, como a amônia, durante o processo de compostagem.

### **2.1.1. Principais fatores que influenciam no processo**

#### **Temperatura**

A temperatura é um dos fatores mais importantes em sistema de compostagem, por depender da atividade microbiana ao longo do processo de degradação. Por meio dessa variável é possível prever o grau de decomposição e estabilização do material (DAY; SHAW, 2005; TANG *et al.*, 2011).

A elevação da temperatura ocorre como resultado das reações de oxidação do material orgânico pelos microrganismos. Segundo Kiehl (1985), o processo de degradação do material orgânico ocorre tanto sob temperaturas inferiores a 45 °C, denominada fase de degradação mesofílica, como sob temperaturas superiores a 45 °C, denominada fase de degradação termofílica.

A temperatura influencia tanto na variedade de microrganismos como na taxa de degradação do material em compostagem, deste modo, ao se atingir altas temperaturas pode ocorrer à eliminação de alguns microrganismos, incluindo os patogênicos. De acordo com Stentiford *et al.* (1996), em sistemas de compostagem por leiras estáticas aeradas a manutenção do composto por 3 a 4 dias em temperatura na faixa de 55 a 65 °C é suficiente para total inativação dos patógenos presentes no meio. No entanto, caso a temperatura alcance valores compreendidos entre 65 e 80 °C, pode ocorrer perda de nutrientes no material em compostagem e eliminação de microrganismos benéficos ao processo (PEREIRA NETO, 2004).

Segundo Azevedo (1993), o principal mecanismo utilizado para controle da temperatura do material em compostagem é a aeração, podendo ser executada por meio de reviramentos periódicos, quando se utiliza o sistema *Windrow*, ou insuflação/sucção do ar, por meio de ventiladores, em sistemas por leiras estáticas aeradas. Paiva (2011) verificou em leiras de compostagem aeradas, sob insuflação, maior temperatura no topo da leira em relação à base, enquanto sob sucção ocorria o contrário, desse modo o autor recomendou à intermitência entre insuflação e sucção do ar na massa em compostagem, visando melhor uniformização da temperatura na leira e conseqüentemente maior eficiência no processo de degradação.

#### **Conteúdo de Água**

Outro fator de extrema importância para o processo de compostagem é o conteúdo de água no material, já que existe uma faixa de disponibilidade na qual é mais eficiente o

transporte de nutrientes requerido para as atividades fisiológicas e metabólicas realizadas pelos microrganismos. O conteúdo de água, além de influenciar no processo biológico, possui papel relevante em outras características físicas da massa em compostagem, como por exemplo: na massa específica, no espaço poroso, na resistência oferecida a passagem de ar e na condutividade térmica do material (LI *et al.*, 2013).

O conteúdo de água ideal para o processo de compostagem está entre 50 e 60 dag kg<sup>-1</sup>, valores superiores a 65 dag kg<sup>-1</sup> proporcionam a ocorrência de regiões anaeróbias, tendo em vista que a água ocupa os espaços porosos presentes na massa em compostagem, obstruindo a passagem do ar. Conteúdos de água abaixo de 35 dag kg<sup>-1</sup>, prejudicam, por sua vez, a atividade microbiana, retardando o processo de degradação bioquímica do material orgânico (AZEVEDO, 1993; PEREIRA NETO, 2004).

Segundo Paiva (2011), a manutenção do conteúdo de água de forma homogênea em leiras estáticas aeradas é muito complexa, pois a heterogeneidade do material gera diferentes taxas de difusão do ar, proporcionando secagem diferenciada do material ao longo da profundidade da leira. De acordo com o autor, o fenômeno da migração de umidade, resultado do processo de convecção natural provocado pelas diferentes densidades e temperaturas do ar dentro da massa em compostagem, é um dos fatores de maior influência na má distribuição da água no material.

### **Relação C/N**

A proporção de carbono orgânico em relação ao nitrogênio presente no material, também denominada relação C/N, exerce grande influência no processo de compostagem. De acordo com a EPA-SA (2007), a faixa ótima para relação C/N no início do processo de compostagem deve estar entre 25 a 40/1, sendo no final do processo, o composto produzido deve apresentar uma relação C/N entre 10 e 20/1.

Na compostagem de resíduos orgânicos provenientes de agroindústrias, frequentemente são realizadas misturas de materiais em proporções adequadas, visando-se obter relação C/N entre 20 e 30 (PAIVA, 2011; MATOS, 2014).

Misturas de materiais orgânicos que possuem baixa relação C/N apresentam maiores perdas de nitrogênio no processo pela volatilização da amônia, enquanto que em misturas de materiais com elevada relação C/N, o tempo necessário para a degradação bioquímica do material orgânico se torna maior (LI *et al.*, 2013).

### Concentração de Oxigênio

O oxigênio é um gás essencial ao processo de degradação bioquímica do material orgânico, uma vez que a concentração de oxigênio influencia a atividade biológica e conseqüentemente a temperatura da massa em compostagem. O fornecimento de oxigênio para o processo de compostagem é realizado por meio do ar ambiente, de maneira natural ou mecânica (PAIVA, 2008, MATOS, 2014). Segundo Graves *et al.* (2000) o oxigênio fornecido, por meio da aeração forçada, ao material em degradação aeróbia não é totalmente absorvido pelos microrganismos, devido à difusão diferencial do gás na água e no ar, entretanto, quando há suficiente fornecimento de ar para controle da temperatura do material em processamento, indiretamente, é satisfeita sua demanda bioquímica de oxigênio.

Segundo Rasapoor *et al.* (2009), baixas taxas de aeração resultam em menor perda de nitrogênio, maior redução na relação C/N e aumento no tempo de duração da fase termofílica. Por outro lado, altas taxas de aeração prejudicam o processo, proporcionando a produção de um composto apenas parcialmente estabilizado. De acordo com Leton e Stentiford (1990), a concentração de oxigênio nos espaços intersticiais da massa em compostagem, deve estar entre 5 a 15%, sendo que valores abaixo de 5% podem causar anaerobiose, enquanto valores maiores que 15% podem levar ao resfriamento do material pela dissipação da energia térmica.

## **2.2. MÉTODOS DE COMPOSTAGEM**

Atualmente, os métodos de compostagem estão diferenciados de acordo com a forma de acondicionamento do material, em “Leiras” ou em “Reatores”, também conhecido como sistema “*In-vessel*”. A compostagem em reatores possui como principal característica, o fato de todo ou parte do processo ser realizado em um volume de controle definido, caracterizado como reator (DIAZ *et al.*, 2007). A compostagem em leiras pode ser subdividida em relação ao método de aeração por reviramento, ou processo “*Windrow*”, e sistema por “Leiras Estáticas Aeradas” (MATOS, 2014).

### **2.2.1. Sistema “*Windrow*”**

No sistema *Windrow*, a aeração é realizada por meio de reviramentos periódicos do material em compostagem, com o objetivo de fornecer oxigênio e reduzir o seu conteúdo de água.

Segundo Paiva (2011), essa forma de tratamento possui como limitações elevada demanda de mão-de-obra e requerimento de áreas relativamente grandes. Apesar disso, Azevedo (1993) afirmou ser essa a forma de compostagem de menor custo dentre todas, mas apresentou como grandes inconvenientes o fato de não se possuir controle preciso sobre as variáveis operacionais do processo.

No sistema *Windrow*, para o tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, na primeira fase de degradação, o material é revolvido em períodos de 3 em 3 dias nos primeiros 30 dias, seguido por reviramentos a cada 6 dias até que a temperatura da massa em compostagem se torne inferior a 40 °C, após essa fase, o material passa pelo processo de maturação por um período de 30 a 60 dias (PEREIRA NETO, 2007).

Em relação à configuração geométrica da leira, esta será função da quantidade disponível, sendo as pilhas formadas com formato de cone, quando as quantidades forem menores, ou leiras com seção trapezoidal, quando as quantidades forem maiores (PAIVA, 2008).

### **2.2.2. Leiras Estáticas Aeradas**

No sistema por leiras estáticas aeradas, a aeração é forçada por insuflação ou sucção de ar na massa em compostagem, utilizando-se ventiladores (LETON; STENTIFORD, 1990; PAIVA, 2011).

Nesse sistema, o material é disposto sobre um duto perfurado, por meio do qual é conduzido o ar insuflado ou succionado na massa, não havendo o seu revolvimento mecânico. Desse modo, o material é degradado primariamente em, aproximadamente, 30 dias (METCALF; EDDY, 2003).

De acordo com Pereira Neto (1987), a compostagem em leiras estáticas aeradas apresenta como vantagens a rápida degradação da matéria orgânica sem exalação de maus odores, além de proporcionar maiores temperaturas na massa, o que favorece a eliminação de microrganismos patogênicos, durante a fase termofílica de degradação. Além disso, em comparação com o sistema *Windrow*, o sistema por leiras estáticas aeradas demanda a metade da área, exige menor quantidade de mão-de-obra e pode ser realizada em qualquer condição climática, já que não há revolvimento do material em compostagem (SILVA *et al.*, 2008). Segundo Almeida *et al.* (2012), este sistema é recomendado para compostagem em grande escala.

A aeração do material pode ser realizada tanto por insuflação como por sucção de ar através da massa em compostagem. Azevedo (1993) relatou inúmeras vantagens da insuflação em relação à sucção, como por exemplo: menor queda na pressão estática do ar e melhor distribuição do ar na massa em compostagem, menor perda de nitrogênio, remoção mais eficiente de energia térmica (calor) do material, além de demandar menor espaço físico, pois não há necessidade de filtrar o ar succionado. No entanto, Li *et al.* (2013) relataram que a aeração por insuflação proporciona resfriamento em torno do duto de aeração, comprometendo a eliminação de microrganismos patogênicos na área próxima ao mesmo. Segundo os autores, aeração por sucção é recomendada quando se dispuser de sistema de coleta e tratamento do ar utilizado. Paiva (2011) verificou em leiras de compostagem aerada, sob insuflação, maior temperatura no topo da leira em relação à base, além de ressecamento em torno do duto de aeração, enquanto sob sucção ocorria ressecamento no topo da leira, menor temperatura no topo em relação à base e maior queda na pressão estática do ar, devido ao selamento dos furos nos dutos de aeração.

Para contornar tais limitações, Paiva (2011) recomendou a utilização de um sistema híbrido de aeração, nesta configuração o sistema opera intermitentemente com 7 dias de aeração, seguidos de 7 dias de sucção, proporcionando maior facilidade operacional, menor consumo de água e menor demanda de potência do sistema de ventilação, ao longo do processo de compostagem.

### **2.2.3. Sistema “*In-vessel*”**

Sistemas de compostagem *In-vessel* são caracterizados por possuírem todo ou parte do processo de degradação do material orgânico, em uma unidade fechada denominada de reator, biodigestor ou bioestabilizador (PAIVA, 2008).

Nos últimos anos a utilização desse sistema de compostagem tem crescido substancialmente, principalmente na Europa e nos Estados Unidos. De acordo com Diaz *et al.* (2007) sistemas de compostagem *In-vessel* podem ser subdivididos de acordo com o movimento do material no reator e com sua configuração. Alguns reatores possuem movimento de rotação, outros possuem sistemas de revolvimento do material, contribuindo para a redução no tamanho das partículas e melhorando a mistura da massa em compostagem.

Compostagem em reatores demandam maiores investimentos e consomem mais energia que os demais sistemas, porém exigem espaços menores e podem ser controlados de forma mais eficiente (LI *et al.*, 2013). Essa forma de compostagem tem sido, frequentemente,

utilizada em processos que demandam elevado controle do conteúdo de água e da concentração de oxigênio no meio, resultando em maiores taxas de degradação do material orgânico. A duração da fase de degradação ativa nestes sistemas dura em torno de 7 a 15 dias (DIAZ *et al.*, 2007).

Segundo Li *et al.* (2013), este tipo de compostagem é mais utilizado para tratamento de resíduos sólidos urbanos, por produzir menor quantidade de gases e por facilitar o uso final do composto produzido, devido à sua boa estabilidade bioquímica.

### 2.3. TAXAS DE AERAÇÃO NA COMPOSTAGEM

A compostagem é um processo aeróbio no qual as necessidades de oxigênio estão associadas às reações de oxidação realizadas pelos microrganismos. A aeração é definida como um dos fatores mais importantes em sistemas de compostagem, no entanto envolve uma alta complexidade em termos de taxa de aeração (KULCU; YALDIZ, 2004).

Em sistemas de compostagem que utilizam aeração forçada, a taxa de aeração pode ser utilizada para controle da temperatura e do conteúdo de água na massa em compostagem, além da remoção de dióxido de carbono do meio, sendo por este motivo, um dos principais meios de controle do processo (LETON; STENTIFORD, 1990; ALMEIDA *et al.*, 2012). No entanto, diferentes taxas de aeração são recomendadas em função das características químicas e biológicas de cada resíduo, como por exemplo, teor de matéria orgânica e degradabilidade, além da fase do processo de degradação (PAIVA, 2011).

Em relação às necessidades de ar, que se expressam como vazão por unidade de área ou unidade de volume ou, ainda, massa seca de material, PINTO (2001) recomendou uma vazão específica mássica de, aproximadamente,  $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$  de ar, tomando-se a massa de material orgânico seco como referência, para compostagem de lodo de esgoto. Segundo o mesmo autor, essa quantidade de ar é fundamental no período inicial do processo, na fase de degradação rápida, quando a atividade microbiana é intensa e dependente da disponibilidade de oxigênio.

Paiva (2008), utilizando-se de leiras estáticas aeradas para compostagem de carcaças de frango, verificou que a vazão específica mássica recomendada por Pinto (2001), era muito elevada para o tipo de resíduo em estudo, trazendo, como consequência, o resfriamento da leira e o retardamento do processo de compostagem. Haug (1993), por sua vez, recomendou, em relação ao material seco, a aplicação de  $125 \text{ a } 460 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$ , considerando essa faixa de

vazão específica mássica suficiente para fornecimento de oxigênio e a remoção do excesso de energia térmica do material. Pereira Neto (2007) recomendou, para atender à demanda de oxigênio no processo de compostagem, o fornecimento de 0,3 a 0,6 m<sup>3</sup> de oxigênio para cada quilo de sólidos voláteis por dia. Considerando-se a concentração de oxigênio no ar de 22%, em volume, isso representa uma taxa de 57 a 113 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> de ar para cada tonelada de sólidos voláteis (MATOS *et al.*, 2012).

Outras recomendações de taxa de aeração para resíduos agrícolas, tomando-se como referência sólidos voláteis no material orgânico seco, são: 20 a 66 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup> (WILEY; PIERCE, 1955); 30 a 70 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup> (POS, 1991); e 18 a 54 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup> (KEENER *et al.*, 2001). Rasapoor *et al.* (2009), trabalhando com compostagem da fração orgânica dos resíduos sólido urbanos, utilizaram taxas de aeração de 24; 36 e 54 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> de ar para cada tonelada de sólidos voláteis e verificaram que a duração da fase termofílica foi de 13; 9 e 4 semanas, respectivamente. Assim, os autores recomendaram, no início do processo (nove primeiras semanas), a aplicação de uma taxa de 36 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup> e, em seguida, uma taxa de 24 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup> até o final do processo de compostagem, reduzindo o gasto de energia consideravelmente. Kulcu e Yaldiz (2004) trabalhando com taxas de aeração entre 6 a 48 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> de ar para cada tonelada de sólidos voláteis, na compostagem de grama juntamente com restos de tomate pimentão e berinjela, proporção em volume de (54:10:20:15), recomendaram a utilização de 24 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> t<sup>-1</sup>, por ser a taxa que proporcionou maior degradação do material orgânico e, conseqüentemente, maior temperatura na massa em compostagem.

#### **2.4. GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR FORÇADO EM CAMADAS DE MATERIAL ORGÂNICO**

A resistência oferecida à passagem do ar através de uma camada de material orgânico depende da velocidade de escoamento, da viscosidade e densidade do ar, além do tamanho, forma, rugosidade superficial, e orientação das partículas, conteúdo de água, estágio de degradação e compactação do material (LI, 1994; SILVA *et al.*, 2008).

O ar, ao passar por um meio poroso, sofre grande influência da quantidade de poros entre partículas, assim como da conectividade entre os mesmos (ALMEIDA *et al.*, 2012). De acordo com Richard *et al.* (2004), em sistemas de compostagem, além da porosidade é imprescindível se conhecer a permeabilidade de gases no meio. O aumento na permeabilidade

do meio resulta em menor gradiente de pressão estática do ar ao ser forçado a atravessar o material, diminuindo a energia requerida pelo sistema de aeração (McGUCKIN *et al.*, 1999).

O gradiente de pressão estática do ar ao atravessar uma camada de material, é estimado, convencionalmente, com a utilização de equações ou gráficos que relacionam a queda na pressão estática do ar por unidade de espessura da camada (gradiente de pressão) com a vazão de ar por unidade de área (vazão específica) (MATOS *et al.*, 2012). No que se refere ao material em compostagem, o gradiente de pressão estática do ar depende do estágio da degradação bioquímica do material em tratamento, sendo que alguns autores observaram tendência de aumento com o período de compostagem (BARRINGTON *et al.*, 2002; MOREIRA *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2008). No entanto, outros autores (PAIVA, 2011; ALMEIDA *et al.*, 2012; MATOS *et al.*, 2012) observaram o contrário. A variação do gradiente de pressão estática do ar ao longo da compostagem influencia a demanda de potência do ventilador, logo o conhecimento dessa variável é extremamente importante para o correto dimensionamento do sistema de aeração.

Os modelos matemáticos utilizados para estimativa do gradiente de pressão estática do ar ao atravessar um meio poroso, tendo a vazão específica de ar como variável independente, foram desenvolvidos de forma empírica ou teórica, nos quais foram levadas em consideração propriedades físicas do material e características do ar (McGUCKIN *et al.*, 1999; RAY *et al.*, 2004; BIAGGIONI *et al.*, 2005).

Os modelos teóricos dificilmente são utilizados para descrever a resistência oferecida ao escoamento do ar ao atravessar uma massa de grãos, pois dependem de diversas variáveis físicas do material, as quais são de difícil obtenção e apresentam grande variabilidade (NAVARRO; NOYES, 2002), por essa razão modelos empíricos tem sido preferidos.

Shedd (1953) utilizou uma equação empírica (Equação 1), para descrever a relação entre gradiente de pressão estática do ar ao atravessar uma camada de grãos e a vazão específica do ar.

$$\Delta P = A_1 \dot{Q}_a^{B_1} \quad (1)$$

em que,

$\Delta P$  – gradiente de pressão estática do ar ( $M T^{-2} L^{-2}$ );

$\dot{Q}_a$  – vazão específica do ar ( $L^3 T^{-1} L^{-2}$ );

$A_1, B_1$  – parâmetros obtidos no ajuste dos dados experimentais ao modelo.

A Equação 1 se apresenta na forma linear, quando plotada em escala logarítmica, e na forma convexa, quando os valores de vazão específica são plotados na ordenada e os valores de gradiente de pressão estática são plotados na abscissa, em um eixo cartesiano. Ressalta-se, no entanto, que a utilização do modelo de Shedd tem sido recomendada para pequenas faixas de variação na vazão específica do ar (NAVARRO; NOYES, 2002).

Hukill & Ives (1955) relacionaram o gradiente de pressão estática em função da vazão específica do ar de acordo com a seguinte Equação:

$$\Delta P = \frac{A_2 \dot{Q}_a^2}{\ln(1 + B_2 \dot{Q}_a)} \quad (2)$$

em que,

$A_2, B_2$  – parâmetros obtidos no ajuste dos dados experimentais ao modelo.

O modelo de Hukill & Ives tem sido recomendado pela *American Society of Agricultural Engineers* (ASAE, 2007), para cálculo do gradiente de pressão estática do ar ao ser forçado em camadas de grãos e sementes, em virtude dos bons ajustes apresentados. No entanto o modelo de Hukill & Ives apresenta como limitação o fato da vazão específica não poder ser explicitada na equação e ser calculada como função do gradiente de pressão estática do ar (NAVARRO; NOYES, 2002).

Hunter (1983) sugeriu o uso de uma equação quadrática (Equação 3) para estimativa do gradiente de pressão estática como função da vazão específica do ar.

$$\Delta P = A_3 \dot{Q}_a + B_3 \dot{Q}_a^2 \quad (3)$$

em que,

$A_3, B_3$  – parâmetros obtidos no ajuste dos dados experimentais ao modelo.

O modelo de Hunter é frequentemente utilizado devido a sua grande simplicidade, quando aplicada ao estudo de distribuição não uniforme do escoamento de ar em silos (NAVARRO; NOYES, 2002).

O gradiente de pressão estática observado em camadas de material orgânico em compostagem, pode ser representado pelos mesmos modelos utilizados para grãos, ou seja, potenciais (Equação de Shedd), logarítmicos (Equação de Hukill & Ives) e quadráticos (Equação de Hunter) (McGUCKIN *et al.*, 1999; SILVA *et al.*, 2008; MATOS *et al.*, 2012).

Algumas pesquisas realizadas com diferentes resíduos orgânicos proporcionaram resultados distintos no que se refere ao gradiente de pressão estática do ar. McGuckin *et al.* (1999), trabalhando com resíduos de folha de alface, bulbos de cebola, cama de frango e serragem de madeira nas proporções, em termos de massa fresca, de (101:130:52:1), encontraram para vazões específicas de ar entre 0,007 e 0,04 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, gradientes de pressão estática do ar variando entre 3 e 120 Pa m<sup>-1</sup>.

Paiva (2011), monitorando o gradiente de pressão estática do ar, após 42 dias de compostagem de carcaças de frango em sistemas de leiras estáticas aeradas, encontrou para as vazões específicas de ar de 0,06; 0,10 e 0,15 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, gradientes de pressão estática de 299; 326 e 370 Pa m<sup>-1</sup>, respectivamente. O mesmo autor observou que o gradiente de pressão estática medido em condições reais, ou seja, na leira, é de 8 a 10 vezes superior ao medido em condições laboratoriais (utilizando-se protótipo com acondicionamento do material em recipientes cilíndricos), sendo a formação de canais preferenciais e de grânulos de grandes dimensões dentro dos reservatórios, além do fator de escala, os possíveis responsáveis pelas diferenças observadas.

Silva *et al.* (2008), estudando a compostagem de bagaço de cana-de-açúcar picado misturado com cama de frango, observaram aumento no gradiente de pressão estática do ar na camada de material ao longo do período de compostagem, segundo os autores, devido ao aumento na massa específica do material. Paiva (2011), ao contrário, observou diminuição no gradiente de pressão estática do ar, ao atravessar uma camada de material orgânico, com o período de compostagem, devido à formação de maiores agregados com os “finos”, da degradação do material orgânico e diminuição no conteúdo de água livre na massa em compostagem, que fez o material diminuir de volume, desobstruindo os poros. Almeida *et al.* (2012), utilizando leiras estáticas aeradas para compostagem de resíduos da suinocultura, observaram decréscimo no gradiente de pressão do ar em relação a duração do processo de compostagem, considerando a mesma taxa de aeração. Segundo os autores a secagem da massa em compostagem ocasionada pela aeração, proporcionou aumento do espaço poroso e, conseqüentemente a redução da resistência do ar ao atravessar o material. O aumento da permeabilidade, juntamente com a redução dos parâmetros inerciais, foi verificado até os 21 dias de compostagem, após este tempo eles permaneceram constantes.

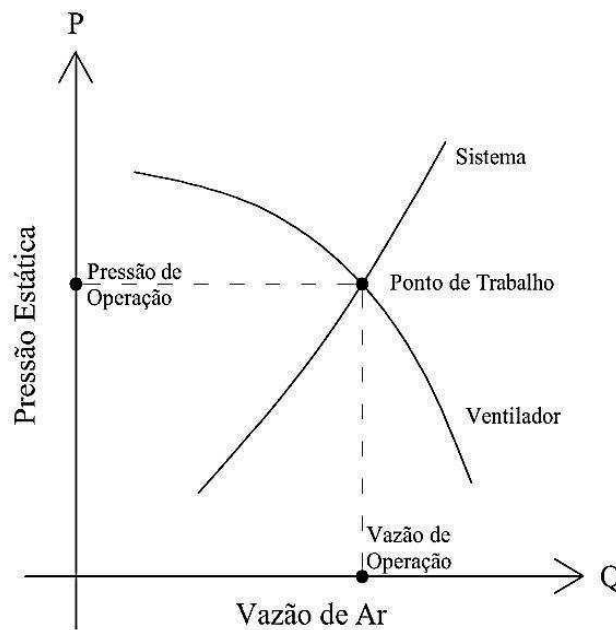
A queda na pressão estática do ar em relação à espessura da camada de material orgânico pode apresentar comportamento linear (MATOS *et al.*, 2012) ou logarítmico (MOREIRA *et al.*, 2008), quando avaliado em protótipos cilíndricos, entretanto isso pode se

tornar complexo em leiras. Em leiras estáticas aeradas por sucção, por exemplo, é comum à formação de crostas sobre o duto de aeração, reduzindo o escoamento do ar na massa e aumentando, proporcionalmente, a queda na pressão estática do ar (PAIVA, 2011), o que pode alterar sensivelmente o perfil da queda na pressão estática do ar.

## 2.5. DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE AERAÇÃO NA COMPOSTAGEM

A partir do conhecimento do gradiente de pressão estática do ar observado para determinada vazão específica, é possível calcular a potência elétrica absorvida pelo ventilador em projetos de sistemas de compostagem por leiras estáticas aeradas (MOREIRA *et al.*, 2008; MATOS, 2014).

Saint-Joly *et al.* (1989), buscando aprimorar sistemas de compostagem aerada, propuseram o gráfico apresentado na Figura 1, para identificação do ponto de trabalho do ventilador.



**Fonte:** Adaptado de Saint-Joly *et al.* (1989).

**FIGURA 1.** Obtenção do ponto de trabalho do ventilador.

Na Figura 1 está representada a curva característica do ventilador e a curva característica do sistema, considerando todas as quedas proporcionadas na pressão estática do ar pelos diversos componentes do sistema, ambas possuindo como variável dependente a

pressão estática do ar e como variável independente a vazão de ar. O ponto de trabalho é determinado pela intersecção das duas curvas, caracterizando os valores de vazão e pressão estática do ar nos quais o ventilador associado ao sistema irá operar.

A partir da queda na pressão estática obtida pela passagem do ar na massa em compostagem, juntamente com a queda na pressão estática decorrente da passagem pelo duto de aeração sobre o qual o material está disposto, e a queda na pressão estática proveniente do atrito com demais partes do sistema de condução e distribuição do ar, pode-se calcular a pressão estática total do sistema a partir da Equação 4 (SAINT-JOLY *et al.*, 1989).

$$P_{total} = (P + P_f + P_c) \quad (4)$$

em que,

$P_{total}$  – pressão estática total do sistema ( $M T^{-2} L^{-1}$ );

$P$  – queda na pressão estática do ar decorrente da passagem através do material ( $M T^{-2} L^{-1}$ );

$P_f$  – queda na pressão estática do ar decorrente de seu atrito com as tubulações ( $M T^{-2} L^{-1}$ );

$P_c$  – queda na pressão estática do ar decorrente de sua passagem através do duto de aeração ( $M T^{-2} L^{-1}$ ).

A queda na pressão estática do ar pela passagem na camada de material, considerando sua altura, caso seja considerado linear (MATOS *et al.*, 2012), pode ser calculada de acordo com a Equação 5.

$$P = \Delta P \times H \quad (5)$$

em que,

$H$  – altura da camada de material (L).

A escolha do ventilador será realizada avaliando-se o ponto de trabalho, plotado na curva característica, e a potência do ventilador, a qual, por sua vez, é função da vazão de ar, da pressão estática a ser fornecida pelo sistema de ventilação e de sua eficiência.

O cálculo da potência do motor, requerido pelo sistema de aeração é realizado conforme apresentado na Equação 6 (NAVARRO; NOYES, 2002).

$$Pot = \frac{P_{total} Q}{\eta} \quad (6)$$

em que,

$Pot$  – potência elétrica absorvida pelo ventilador (W);

$P_{total}$  – pressão estática total a ser fornecida pelo ventilador (Pa);

$Q$  – vazão de ar ( $m^3 s^{-1}$ ), e

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

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em um galpão coberto e com laterais fechadas, com aproximadamente  $150 m^2$  de área, localizado na Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. As coordenadas geográficas do local correspondem à latitude  $20^{\circ}46'07''$  S e longitude  $42^{\circ}51'46''$  W, com altitude média de 674 m.

Os resíduos utilizados foram a cama de frango, importante resíduo da agropecuária regional, e os agentes estruturantes e fontes de carbono: bagaço de cana-de-açúcar picado, serragem de madeira e casca de frutos do cafeeiro, também conhecida como palha de café.

A cama de frango foi proveniente de um galpão de recria de aves de corte localizada no município de São Miguel do Anta – MG. A cama foi utilizada por 3 ciclos de recria, permanecendo no galpão por aproximadamente 135 dias, sendo a palha de café, o material utilizado para forragem do piso no primeiro ciclo.

O bagaço de cana-de-açúcar foi coletado em uma usina sucroalcooleira localizada no município de São Pedro dos Ferros – MG. Devido às operações realizadas na usina, o bagaço apresentava-se picado.

A serragem de madeira foi obtida na serraria da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG. As madeiras que deram origem ao resíduo foram o Eucalipto, o Pinus e o Angelim Amargoso, no entanto, houve predominância da serragem de Eucalipto.

A palha de café foi proveniente de uma unidade de beneficiamento de café em coco, localizada no município de São Miguel do Anta – MG, sendo a espécie de café beneficiado na unidade o *coffea arabica*.

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Visando a obtenção da relação C/N de cada resíduo, determinou-se o teor de carbono orgânico total e de nitrogênio total. O teor de carbono orgânico total foi quantificado conforme estabelecido no Método Oficial de Análises de Fertilizantes do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, apresentado na Instrução Normativa nº 28, de 27 de julho de 2007, o qual utiliza o método de oxidação com dicromato a quente (BRASIL, 2007). Para a determinação do nitrogênio total foi utilizado o método semi-micro Kjeldahl (KIEHL, 1985; MATOS, 2012).

A quantificação do conteúdo de água presente nos resíduos seguiu o procedimento padrão de estufa para materiais vegetais, com secagem a 60-65 °C, por 24 h, seguida de secagem monitorada a 100-105 °C (MATOS, 2012).

Depois de quantificados os teores de nitrogênio total e carbono orgânico total de todos os resíduos, calculou-se a massa seca de cama de frango a ser misturada com os agentes estruturantes e fonte de carbono: bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café de tal modo que, as misturas apresentassem relação C/N inicial de 25/1.

Devido à limitação de ventiladores utilizados no sistema de aeração, apenas as misturas de cama de frango com os agentes estruturantes, bagaço de cana-de-açúcar e palha de café foram submetidos ao processo de compostagem. A escolha dos agentes estruturantes a serem compostados teve como premissa resultados de trabalhos anteriores sobre variação no gradiente de pressão estática do ar ao longo do processo de compostagem, tendo sido verificado aumento no gradiente de pressão do ar para o bagaço de cana-de-açúcar (SILVA *et al.*, 2008) e decréscimo para a palha de café (MATOS *et al.*, 2012), com o tempo de compostagem do material. Depois de misturados os resíduos, foi realizada a correção do conteúdo de água para 60 dag kg<sup>-1</sup> (base úmida), sendo o material compostado, utilizando-se o sistema por leiras estáticas aeradas, por 30 dias, período de tempo suficiente para que ocorresse a fase termofílica. Para consideração do final da fase termofílica, foram seguidas as recomendações apresentadas por Kiehl (1985), o qual preconiza uma relação C/N do material menor que 18/1 e temperatura da pilha menor que 40 °C.

As leiras foram construídas utilizando-se seção triangular com 1,5 m de base, 1 m de altura e 2 m de comprimento (Figura 2), os resíduos foram dispostos sobre dutos com formato triangular, com base e altura de 10 cm e furos de 1/8" de diâmetro uniformemente distribuídos. Cada leira possuía um ventilador centrífugo (motor elétrico de ¾ cv de potência), o qual era acionado por meio de um termostato digital, sempre que a temperatura da massa,

no centro da leira, atingia 65 °C. Considerando-se que, com a aeração a temperatura da massa diminui, sempre que ela atingia 55 °C o conjunto moto-ventilador era desligado.



**FIGURA 2.** Vista da leira A (bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango) e leira B (palha de café e cama de frango) no início do processo de compostagem.

Para acompanhamento do processo de compostagem, além da relação C/N, também foram monitoradas as concentrações de sólidos voláteis, a qual foi obtida após calcinação do material em mufla, sob temperatura de 550 °C, por 2 h (KIEHL, 1985; MATOS, 2012).

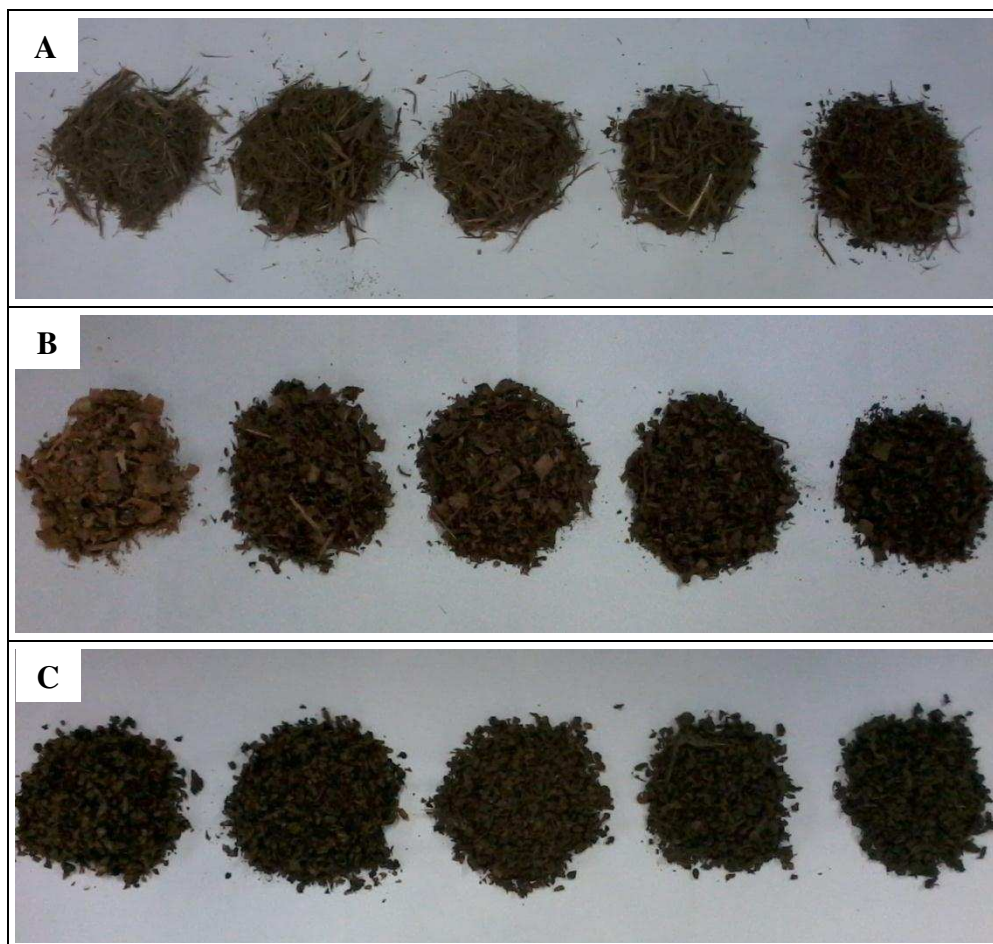
Os valores de relação C/N e a concentração de sólidos voláteis para as misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café, antes e depois de serem submetidos ao processo de compostagem estão apresentados na Tabela 1.

**TABELA 1.** Relação C/N e concentração de sólidos voláteis no material antes e depois do processo de compostagem.

Estádio	Material	Relação C/N	Sólidos Voláteis (dag kg <sup>-1</sup> )
Antes da compostagem	Bagaço de cana + Cama de frango	29,25	81,23
	Palha de café + Cama de frango	21,27	72,73
Depois da compostagem	Bagaço de cana + Cama de frango	13,07	59,25
	Palha de café + Cama de frango	15,06	62,25

Também foram realizadas misturas variando a proporção de cama de frango em relação aos agentes estruturantes e fontes de carbono: bagaço de cana-de-açúcar, serragem de

madeira e palha de café. As proporções de cama de frango utilizadas nas misturas foram 0; 10; 20; 30 e 40%, em base volumétrica dos referidos resíduos (Figura 3).



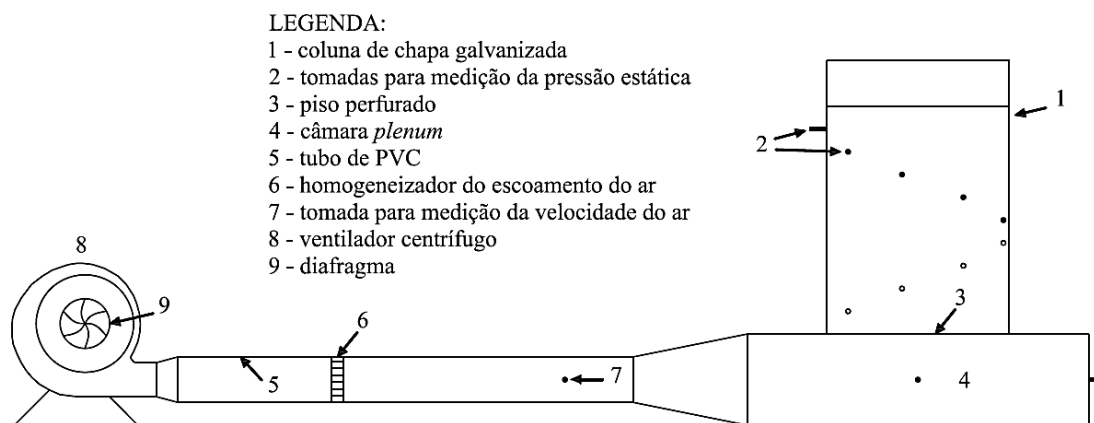
**FIGURA 3.** Avaliação visual das alterações proporcionadas pelas misturas de cama de frango, em proporções de 0; 10; 20; 30 e 40%, respectivamente, em relação ao bagaço de cana-de-açúcar picado (A), serragem de madeira (B) e palha de café (C).

Após os resíduos serem misturados, realizava-se a correção no conteúdo de água do material para  $60 \text{ dag kg}^{-1}$  (base úmida), permanecendo a mistura em repouso por 24 h para uniformização do conteúdo de água no material e, em seguida efetuavam-se as medições de queda na pressão estática do ar ao ser forçado a atravessar a camada de material.

A massa específica úmida dos materiais “*in natura*”, das diferentes misturas e do composto orgânico foi obtida dividindo-se a massa necessária para completar uma coluna circular com diâmetro de 0,8 m e altura de 1 m, pelo respectivo volume da coluna ( $0,503 \text{ m}^3$ ).

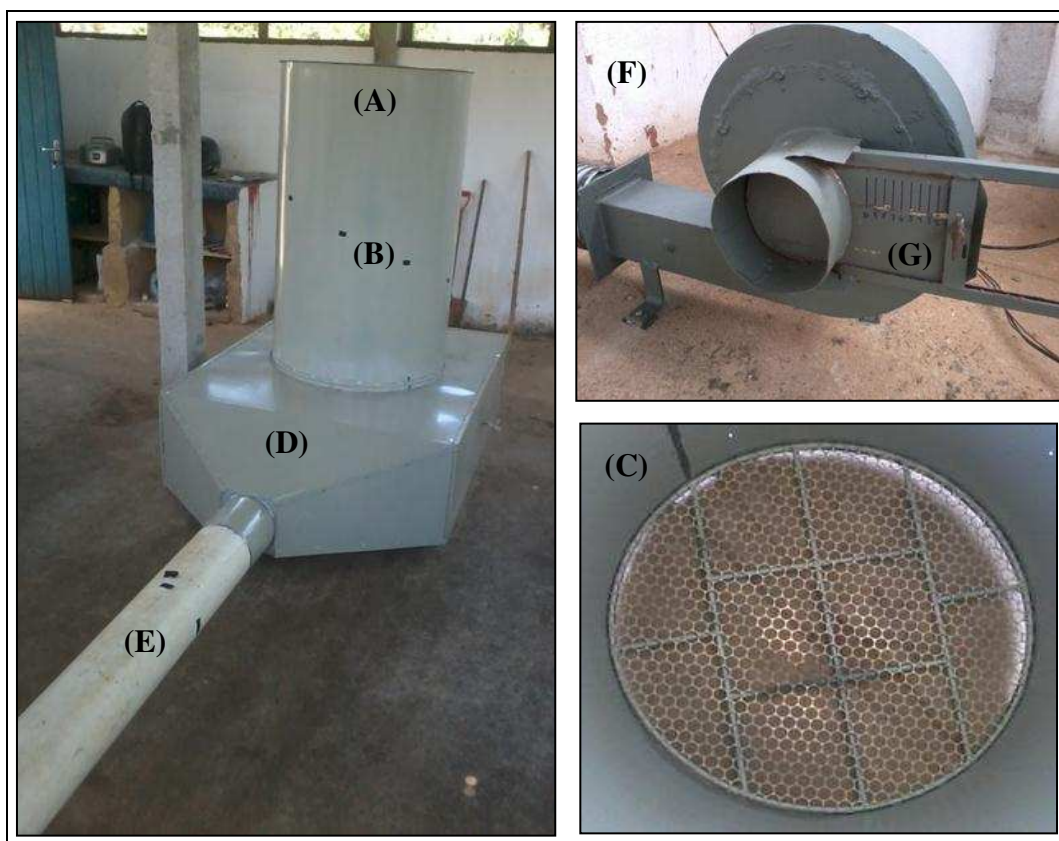
### 3.2. DETERMINAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR

As medições de queda da pressão estática do ar ao atravessar a camada de resíduos orgânicos foram realizadas em um protótipo especialmente dimensionado e construído para esse fim, conforme apresentado na Figura 4, denominado Protótipo para Medição da Queda de Pressão Estática do Ar (PMQPEA).



**FIGURA 4.** Protótipo utilizado na medição da queda de pressão estática do ar insuflado em camadas de diferentes misturas de materiais orgânicos.

O PMQPEA foi construído em chapa de aço e estrutura metálica, sendo constituído pelos seguintes componentes: (1) coluna de chapa galvanizada, medindo 1,2 m de altura, com 0,80 m de diâmetro (Figura 5A); (2) tomadas para medição da pressão estática, constituídas por nove orifícios com 5 mm de diâmetro, distanciados em 0,10 m no sentido vertical, em torno da coluna (Figura 5B); (3) piso perfurado, constituído por chapa inox com furos circulares de 24 mm de diâmetro e 80% de perfuração (Figura 5C); (4) câmara *plenum*, em chapa galvanizada, com dimensões de: 1,50 m de comprimento, 1,2 m de largura e 0,40 m de altura (Figura 5D); (5) tubo de PVC, medindo 2,0 m de comprimento e diâmetro de 0,20 m, utilizado para insuflar o ar do ventilador até o *plenum* (Figura 5E); (6) homogeneizador, para uniformização do fluxo de ar colocado a 1 m da entrada do *plenum*; (7) tomada para medição da velocidade do ar, localizada a 0,5 m da entrada do *plenum*; (8) ventilador centrífugo de pás retas, acionado por motor elétrico com potência de  $\frac{3}{4}$  de cv a 3410 rpm (Figura 5F); (9) diafragma fixo à entrada de ar, o qual possibilitou a variação na vazão (Figura 5G).



**FIGURA 5.** Vistas dos componentes constituintes do Protótipo para Medição da Queda de Pressão Estática do Ar: (A) – coluna de chapa galvanizada; (B) – tomadas para medição da pressão estática; (C) – piso perfurado; (D) – câmara *plenum*; (E) – tubo de PVC; (F) – ventilador centrífugo e (G) – diafragma.

Com a finalidade de eliminar possíveis vazamentos de ar, utilizou-se “veda calha” para calafetar todas as uniões internas da câmara *plenum* (Figura 6A). Após a montagem do sistema de insuflação, o ventilador foi acionado e a saída de ar da câmara *plenum* vedada, utilizando-se uma lona plástica posicionada abaixo da coluna, de tal modo que o aumento na pressão do ar facilitasse a identificação da ocorrência de possíveis vazamentos, já que proporcionaria a formação de bolhas de sabão a partir da espuma aplicada nas uniões do PMQPEA (Figura 6B). Para otimizar o trabalho de enchimento e esvaziamento de material, a coluna e a câmara *plenum* foram construídas independentemente, sendo acopladas por meio de um sistema de encaixe o qual possuía uma borracha, colocada com a finalidade de vedação (Figura 6C).

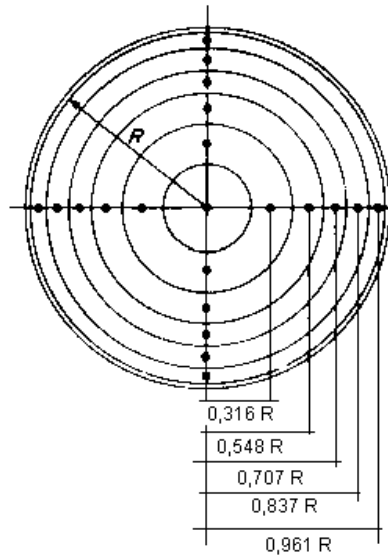


**FIGURA 6.** Acabamento do Protótipo para Medição da Queda de Pressão Estática do Ar: (A) – calafetagem das uniões; (B) – verificação de vazamentos; (C) – colagem da borracha no encaixe.

O acondicionamento do material na coluna foi realizado de tal forma que a compactação proveniente do enchimento ocorresse uniformemente no perfil da camada, sendo efetuada de forma gradual, em camadas de 10 cm de espessura, com altura de queda do material sendo fixada em 1 m. Dessa forma, procedeu-se o enchimento da coluna com a mistura de material orgânico até se obter uma camada com 1 m de altura de material.

A queda de pressão estática do ar foi quantificada para cada mistura de materiais e para cada material separadamente, variando-se a vazão específica do ar fornecida pelo ventilador por meio do ajuste no diafragma, posicionado na entrada de ar do ventilador. Os valores de vazão específica variaram de 0,02 a 0,13  $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ , sendo aferidos com base nos valores da velocidade do ar, os quais foram medidos utilizando-se um anemômetro térmico marca – TEXTO, modelo – testo 425, com resolução de 0,01  $\text{m s}^{-1}$  e faixa de medição de 0 a 20  $\text{m s}^{-1}$ .

As medições da velocidade do ar foram realizadas seguindo-se os procedimentos adotados para obtenção de curvas características de ventiladores, padronizados pela *Air Moving and Conditioning Association* (AMCA) (SILVA, 2008). Para cada abertura do diafragma, foram realizadas 100 leituras de velocidade do ar, tomadas nas diagonais da tubulação, posicionadas ortogonalmente entre si. Em cada seção, correspondente a uma distância radial da tubulação (Figura 7), foram realizadas cinco leituras, em cuja zona estabelecida foi admitida a mesma influência em relação ao comportamento do ar.



**Fonte:** SILVA (2008)

**FIGURA 7.** Perfil para identificação dos pontos de medição da velocidade do ar.

Com o intuito de verificar uma possível queda na pressão estática do ar ao atravessar a chapa perfurada, efetuaram-se medições de pressão na câmara *plenum*, estando à coluna cilíndrica do PMQPEA vazia, o que comprovou sua insignificância tanto quando aplicadas as menores como as maiores vazões específicas de ar.

As medições da queda de pressão estática do ar ao atravessar a camada de 1 m de material, antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, e das diferentes proporções de cama de frango misturadas com bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café, foram realizadas em três posições da câmara *plenum*, realizando-se 3 repetições para cada material. As repetições consistiram em encher a coluna, realizar as medições, esvaziá-la, misturar o resíduo e enchê-la, novamente.

Para o material compostado, realizou-se medições de queda na pressão estática do ar a cada 0,10 m de espessura de material, no início e fim do processo de compostagem. Todas as medições de pressão foram realizadas utilizando-se um micro manômetro digital marca – KIMO, modelo – MP 120, com resolução de 1 Pa e faixa de medição de 0 a 1000 Pa.

A temperatura do ar ambiente foi monitorada por meio de um termômetro termopar digital marca – DWYER, modelo – 472A-1, resolução de 0,1 °C e faixa de medição de 0,1 a 500 °C, o qual era ligado a uma sonda posicionada próximo ao diafragma do ventilador. A umidade relativa do ar ambiente foi monitorada por meio de um termo-higrômetro, marca – INCOTERM, modelo – 7666.02.0.00, precisão de 5% UR e faixa de medição de 15 a 95% UR, posicionado próximo ao diafragma do ventilador.

A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas durante todas as medidas de queda de pressão estática do ar, para cada tipo de mistura de materiais orgânicos, sendo os valores médios e os respectivos desvios padrão apresentados na Tabela 2.

**TABELA 2.** Média e desvio padrão da temperatura e umidade relativa do ar ambiente monitoradas para cada material orgânico.

Material	T (°C)	UR (%)
Bagaço de cana + Cama de frango	25,0 ± 3,6	68 ± 18
Serragem + Cama de frango	30,1 ± 1,6	50 ± 6
Palha de café + Cama de frango	28,4 ± 2,6	55 ± 7

Depois de realizados os ensaios, aos dados de gradiente de pressão (obtido com dados de queda de pressão para 1 m de camada de material) e vazão específica de ar, foram ajustados os modelos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter, utilizando-se análises de regressão pelo método dos mínimos quadrados. Para ajuste dos modelos foi utilizado o programa *STATISTICA 7.0*. A escolha do melhor modelo baseou-se nos parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P), e desvio padrão da estimativa ( $S_y$ ). O erro médio relativo e o desvio padrão da estimativa foram calculados, respectivamente, utilizando-se as Equações 7 e 8.

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right| \quad (7)$$

$$S_y = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{(n - 2)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

em que:

$P$  – erro médio relativo (%);

$S_y$  – desvio padrão da estimativa ( $\text{Pa m}^{-1}$ );

$n$  – número de observações experimentais;

$Y$  – valor observado experimentalmente ( $\text{Pa m}^{-1}$ );

$\hat{Y}$  – valor estimado pelo modelo ( $\text{Pa m}^{-1}$ );

$(n - 2)$  – graus de liberdade, idêntico para os três modelos avaliados.

Depois de selecionado o melhor modelo para cada agente estruturante e fonte de carbono, os parâmetros da equação obtidos para as diferentes proporções de cama de frango foram considerados variáveis dependentes e submetidos à análise de agrupamento por otimização de Tocher, para determinar quais proporções possuíam curvas similares. As análises de agrupamento foram realizadas utilizando o programa estatístico *SAEG*<sup>®</sup>.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO MATERIAL

Os valores da massa específica e do conteúdo de água do material obtido a partir das misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café, estão apresentados, na Tabela 3.

**TABELA 3.** Massa específica e conteúdo de água (base úmida) do material proveniente das misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café.

Material	Cama de Frango (%) <sup>a</sup>	Massa Específica (kg m <sup>-3</sup> )		Conteúdo de Água (dag kg <sup>-1</sup> )
		Úmida <sup>b</sup>	Seca <sup>c</sup>	
Bagaço de cana + Cama de frango	0	175	62	64,3
	10	245	88	64,0
	20	311	120	61,6
	30	372	147	60,6
	40	423	171	59,6
Serragem + Cama de frango	0	235	97	58,7
	10	304	117	61,6
	20	359	159	55,9
	30	413	181	56,2
	40	444	196	55,9
Palha de café + Cama de frango	0	317	112	64,7
	10	328	129	60,6
	20	368	155	58,0
	30	371	158	57,6
	40	451	191	57,7

Em que, <sup>a</sup> proporção de cama de frango na mistura em base volumétrica; <sup>b</sup> material úmido, <sup>c</sup> material seco.

De acordo com os valores obtidos, verifica-se que o acréscimo de cama de frango aos agentes estruturantes e fonte de carbono, proporcionou aumento na massa específica da mistura, principalmente quando se analisa a massa específica obtida com o material seco, condição em que não há influência do conteúdo de água no material. A cama de frango possui massa específica maior que o bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café, logo, ao ser misturada a esses materiais, proporciona aumento na massa específica da mistura.

À medida que se aumentou a proporção da cama de frango em relação aos agentes estruturantes, passou a ocorrer maior ocupação dos espaços porosos existentes no meio, fazendo com que o volume da mistura permanecesse praticamente constante, embora tenha havido aumento de massa. A mistura contendo o bagaço de cana-de-açúcar como agente estruturante apresentou o maior aumento de massa específica com a adição de cama de frango, seguido daquelas em que o agente estruturante eram a serragem de madeira e a palha de café.

A proporção, em termos de volume, de cama de frango adicionada ao bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café, para obtenção de relação C/N de 29/1, 26/1 e 21/1, foram de 11; 14 e 8%, respectivamente. Observa-se que relação C/N no material após a mistura apresentou uma pequena variação em relação ao valor estabelecido inicialmente de 25/1, sendo a heterogeneidade do material, a principal responsável por essa variação. A proporção, em termos de massa ou volume, entre diferentes resíduos, visando alcançar uma relação C/N ideal para início do processo de compostagem, que segundo Matos (2014) deve estar compreendido entre 20 e 30 para resíduos orgânicos provenientes de agroindústrias, variou de acordo com as características dos materiais misturados, assim, não houve uma proporção única para as diferentes misturas de resíduos, uma vez que esta proporção foi definida com base nos teores de carbono e nitrogênio, massa específica e conteúdo de água presente nos materiais.

A massa específica e o conteúdo de água na mistura de materiais foram avaliados no início e fim da 1ª fase do processo de compostagem que durou em média 30 dias, os valores destas variáveis considerando o início (cama de frango misturada com: bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira ou palha de café) e fim (cama de frango misturada com: bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café) do processo de compostagem, estão apresentados na Tabela 4.

O conteúdo de água nos materiais das diferentes misturas, no início do processo de compostagem, variou de 59,8 a 61,8 dag kg<sup>-1</sup>, portanto dentro da faixa considerada ideal para o início do processo de compostagem, que é de 40 a 65 dag kg<sup>-1</sup> (AZEVEDO, 1993; PEREIRA NETO, 2004; MATOS, 2014). No material compostado, proveniente da mistura de bagaço de cana-de-açúcar e cama de frango, o conteúdo de água na fase final do processo ficou acima dos valores recomendados, no entanto, devido às características físicas do material, isso não trouxe prejuízos ao processo de compostagem.

**TABELA 4.** Massa específica e conteúdo de água (base úmida) nas misturas de materiais orgânicos, antes e depois de terem sido submetidas ao processo de compostagem.

Material	Cama de Frango (%) <sup>a</sup>	Estádio da Compostagem	Massa Específica (kg m <sup>-3</sup> )		Conteúdo de Água (dag kg <sup>-1</sup> )
			Úmida <sup>b</sup>	Seca <sup>c</sup>	
Bagaço de cana + Cama de frango	11	Antes	264	101	61,8
		Depois	377	113	70,1
Serragem + Cama de frango	14	Antes	367	148	59,8
Palha de café + Cama de frango	8	Antes	317	126	60,2
		Depois	309	143	53,7

Em que, <sup>a</sup> proporção de cama de frango na mistura em base volumétrica; <sup>b</sup> material úmido, <sup>c</sup> material seco.

Em relação à massa específica seca das misturas de materiais, antes e depois do processo de compostagem, verificou-se aumento de, aproximadamente, 12 e 13% nessa variável para o composto proveniente do bagaço de cana-de-açúcar e da palha de café, respectivamente. Matos *et al.* (2012) encontraram para palha de café misturada com cama de frango, razão entre massas de 2,5:1 (proporção volumétrica de 28,6% de cama de frango), massas específicas de 142 e 218 kg m<sup>-3</sup> (base seca), considerando o material antes e depois de ser submetido ao processo de compostagem. A massa específica obtida pelos autores antes do processo de compostagem, considerando a proporção de cama de frango na mistura, está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho (Tabela 3). Silva *et al.* (2008) obtiveram, para bagaço de cana-de-açúcar, massa específica seca de 56 kg m<sup>-3</sup>, enquanto para o bagaço de cana-de-açúcar misturado com cama de frango (38% em volume), após 30 dias de compostagem, massa específica seca de 215 kg m<sup>-3</sup>. Os autores atribuíram o aumento na massa específica do material à mistura de material de maior massa específica (cama de frango) e à diminuição no tamanho das partículas, em decorrência da sua degradação bioquímica. A massa específica seca do bagaço de cana-de-açúcar obtida neste trabalho foi de 62 kg m<sup>-3</sup>, sendo pouco superior à encontrada pelos referidos autores, no entanto, no que se refere ao estágio depois da compostagem, as massas específicas diferiram consideravelmente, embora seja importante ressaltar que foram utilizadas proporções diferentes de cama de frango na mistura, nos dois trabalhos, o que dificulta comparação dos resultados. Segundo Pereira Neto (2007), ao término do processo de compostagem, a massa específica úmida do material deve estar entre 450 e 550 kg m<sup>-3</sup> e, considerando-se que o material possua conteúdo de água de aproximadamente 60 dag kg<sup>-1</sup> (base úmida), massa específica seca entre 180 e 220

kg m<sup>-3</sup>. Os resultados obtidos neste trabalho estão inferiores aos citados, porém, há de se ressaltar que o referido autor teve como referência, resíduos sólidos urbanos, sabidamente de maior massa específica que os materiais utilizados como agentes estruturantes e fonte de carbono, neste trabalho.

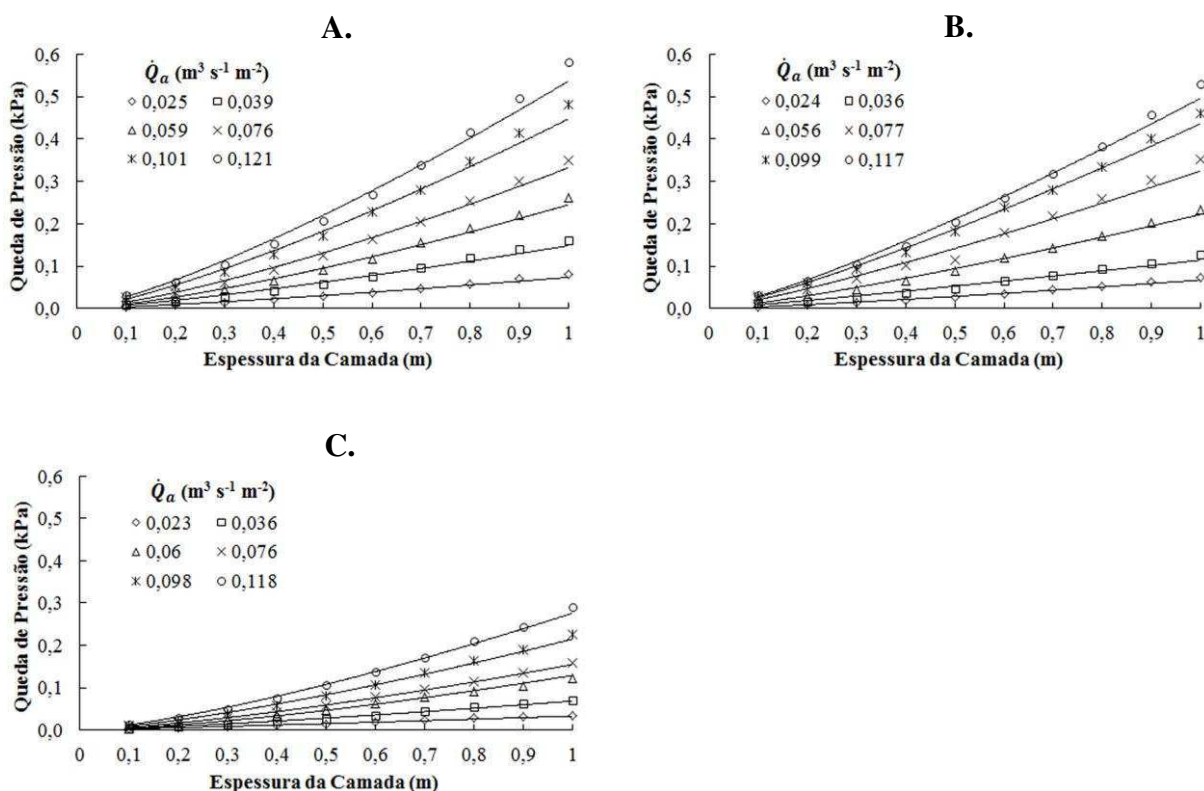
A degradação do material orgânico ao longo do processo de compostagem, além de contribuir para o aumento na massa específica, influenciou na redução do volume da pilha de material em compostagem. O volume de material presente no início do processo de compostagem foi de 1,5 m<sup>3</sup> para cada mistura, sendo verificado, ao término do processo, um volume de 0,59 m<sup>3</sup> de composto em que o agente estruturante era o bagaço de cana-de-açúcar e 0,96 m<sup>3</sup> quando era a palha de café. Assim, houve redução de aproximadamente 60% no volume inicial, na mistura cujo agente estruturante era o bagaço de cana-de-açúcar e 36% quando utilizado a palha de café.

Diversos são os fatores que influenciam na redução de volume do material em processo de compostagem. Segundo Yue *et al.* (2008), a redução de volume observado em uma massa em compostagem é dividida em dois estágios, nos primeiros dias de compostagem ocorre à redução física, proveniente da compactação do material e, posteriormente, a redução proveniente da perda de massa em função da degradação do material orgânico e da perda de água do material.

Em sistemas de compostagem por leiras estáticas aeradas, tem sido observada redução tanto de volume como de massa do material. A redução no volume de material ao longo do processo de compostagem varia com o tipo de sistema adotado, segundo Yue *et al.* (2008), dentre os sistemas de compostagem por aeração natural, sistema *Windrow* e leiras estáticas aeradas, o sistema *Windrow* apresenta a maior redução de volume, que pode chegar a até 83% do volume inicial. Os mesmos autores, ao estudarem a compostagem de lodo de esgoto misturado com palha de milho e serragem de madeira, observaram maior redução de volume no material em que a mistura do lodo foi feita com palha de milho, e que o aumento na proporção do agente estruturante na mistura proporcionava menores reduções no volume do material, ao longo do processo de compostagem. Orrico Júnior *et al.* (2009), ao utilizarem a fração sólida da água residuária de suinocultura como substrato para compostagem em sistemas *Windrow*, observaram que a redução de volume apresentava comportamento quadrático, com redução acentuada nas primeiras semanas de processamento, seguida de desaceleração gradual até o fim do processo. A redução de volume observada pelos autores ao final do processo chegou a 64,5% do volume inicial.

## 4.2. QUEDA DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR EM CAMADAS DE MATERIAL ORGÂNICO

A queda na pressão estática do ar ao atravessar camadas de material constituído pelas misturas de bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira ou palha de café com cama de frango, nas proporções, em termos de volume, de 8,1:1; 6,1:1 e 11,5:1, respectivamente, foi monitorada antes e depois do material ter sido submetido ao processo de compostagem. As curvas de queda na pressão estática do ar, em função da espessura da camada de material, obtidas para as três misturas, antes de serem submetidas ao processo de compostagem, estão apresentadas na Figura 8.



**FIGURA 8.** Queda na pressão estática do ar em função da espessura da camada de cama de frango misturada com bagaço de cana-de-açúcar (A); serragem de madeira (B) ou palha de café (C), antes de serem submetidas à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\dot{Q}_a$ ).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 8, a queda na pressão estática do ar aumentou de forma potencial com a espessura da camada de material, deste modo ajustaram-se equações as quais possuíam, como variável dependente, a queda na pressão estática do ar e, como variável independente, a espessura da camada de material. As equações

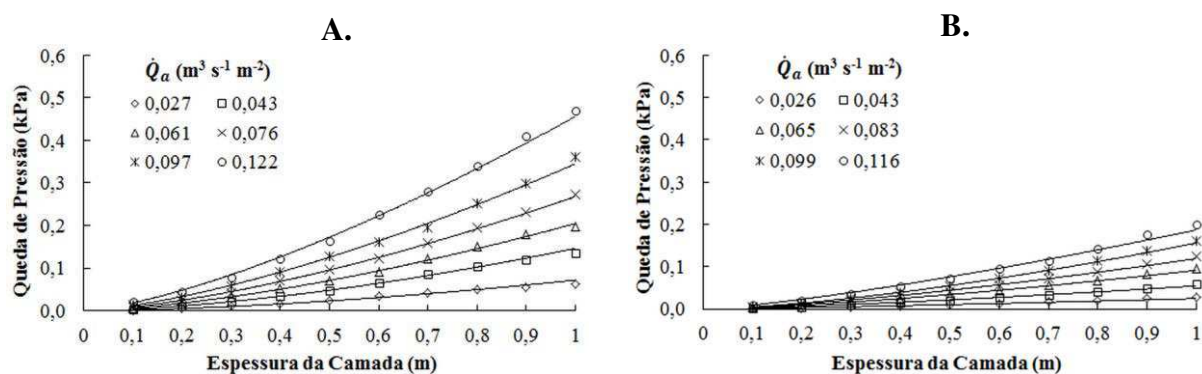
ajustadas com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para cada vazão específica de ar aplicada, estão apresentadas na Tabela 5.

**TABELA 5.** Equações ajustadas para estimativa da queda na pressão estática do ar (kPa), em função da espessura da camada de material (m), antes de ser submetido à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

Material	Cama de Frango (%) <sup>a</sup>	$\dot{Q}_a$ ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )	Equação	$R^2$
Bagaço de cana + Cama de frango	11	0,024	$0,0737 H^{1,2591}$	0,986
		0,039	$0,1482 H^{1,2582}$	0,987
		0,059	$0,2450 H^{1,3626}$	0,995
		0,076	$0,3322 H^{1,3429}$	0,998
		0,101	$0,4472 H^{1,2954}$	0,994
		0,121	$0,5365 H^{1,2881}$	0,994
Serragem + Cama de frango	14	0,024	$0,0673 H^{1,2255}$	0,993
		0,036	$0,1141 H^{1,1078}$	0,981
		0,056	$0,2219 H^{1,2352}$	0,996
		0,077	$0,3246 H^{1,1956}$	0,989
		0,099	$0,4358 H^{1,2158}$	0,997
		0,117	$0,4959 H^{1,2322}$	0,996
Palha de café + Cama de frango	8	0,022	$0,0328 H^{1,1319}$	0,976
		0,036	$0,0683 H^{1,2833}$	0,995
		0,060	$0,1291 H^{1,4749}$	0,997
		0,076	$0,1549 H^{1,3892}$	0,997
		0,098	$0,2149 H^{1,3697}$	0,996
		0,118	$0,2762 H^{1,3566}$	0,997

Em que, <sup>a</sup> proporção de cama de frango na mistura em base volumétrica.

As curvas de queda na pressão estática do ar, em função da espessura da camada de material, obtidas para as misturas de materiais orgânicos, depois de terem sido submetidas ao processo de compostagem, estão apresentadas na Figura 9.



**FIGURA 9.** Queda na pressão estática do ar em função da espessura da camada de cama de frango misturada com bagaço de cana-de-açúcar (A) ou palha de café (B), depois de terem sido submetidas à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\dot{Q}_a$ ).

As equações ajustadas para estimativa da queda na pressão estática do ar com os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), para cada vazão específica de ar aplicada, depois de o material ter sido submetido à compostagem, estão apresentadas na Tabela 6.

**TABELA 6.** Equações ajustadas para estimativa da queda na pressão estática do ar (kPa), em função da espessura da camada de material (m), depois de ter sido submetido à compostagem, sob diferentes vazões específicas de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

Material	Cama de Frango (%) <sup>a</sup>	$\dot{Q}_a$ ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ )	Equação	$R^2$
Bagaço de cana + Cama de frango	11	0,027	$0,0716 H^{1,6623}$	0,994
		0,043	$0,1461 H^{1,6087}$	0,999
		0,060	$0,2045 H^{1,5330}$	0,999
		0,076	$0,2680 H^{1,4925}$	0,999
		0,097	$0,3449 H^{1,4603}$	0,999
		0,122	$0,4563 H^{1,4037}$	0,997
Palha de café + Cama de frango	8	0,026	$0,0249 H^{1,2470}$	0,962
		0,043	$0,0549 H^{1,3395}$	0,996
		0,065	$0,0917 H^{1,4180}$	0,998
		0,083	$0,1195 H^{1,4251}$	0,997
		0,099	$0,1564 H^{1,4961}$	0,998
		0,116	$0,1870 H^{1,2966}$	0,993

Em que, <sup>a</sup> proporção de cama de frango na mistura em base volumétrica.

As curvas de queda na pressão estática do ar ao longo da camada de material, antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, apresentaram comportamento semelhante, tendo sido ajustado o modelo potencial para descrição de tais variações.

Moreira *et al.* (2008), verificaram comportamento logarítmico das curvas de variação da pressão estática do ar, em relação à espessura da camada de bagaço de cana-de-açúcar misturado com cama de frango, havendo diminuição na queda da pressão estática com a espessura de camada de material atravessada. Matos *et al.* (2012) encontraram, para palha de café misturada com cama de frango, aumento linear na queda da pressão estática do ar em relação à espessura da camada de material, tendo sido observado, maior queda de pressão estática com o aumento na vazão específica de ar, corroborando com resultados obtidos por McGuckin *et al.* (1999).

Analisando os resultados apresentados para a queda na pressão estática do ar ao longo da camada de material, observa-se que as misturas que tiveram o bagaço de cana-de-açúcar e a serragem de madeira como agentes estruturantes foram as que proporcionaram maior queda na pressão estática do ar, sendo aproximadamente duas vezes superior que a observada quando a palha de café foi utilizada como agente estruturante, considerando-se mesma vazão específica de ar.

A menor queda na pressão estática do ar, verificada quando utilizada à palha de café como agente estruturante, pode estar relacionado à forma esférica do resíduo, o qual apresenta grandes espaços porosos entre as partículas do material, quando empilhado. Outro fator importante é o aspecto de concha do material, decorrente da sua condição de fruta aproximadamente esférica ou elipsoidal. As cavidades convexas, presentes na maioria das cascas, podem ser preenchidas com materiais finos, como a cama de frango, sem contudo, obstruir, expressivamente, os espaços porosos do material, proporcionando menor resistência à passagem do ar.

A queda na pressão estática do ar, ao longo de uma camada de material orgânico, depende principalmente de suas características físicas. Grande parte dos resíduos utilizados como agentes estruturantes, quando umedecidos, apresentam redução significativa na resistência oferecida à compactação, principalmente quando o conteúdo de água está dentro da faixa recomendada para compostagem. Após a montagem da pilha de compostagem, verifica-se que a massa específica do material aumenta com a profundidade da camada, enquanto que o espaço poroso e permeabilidade diminuem (RICHARD *et al.*, 2004; HUET *et al.*, 2012).

Resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar, quando triturados, umedecidos e empilhados, tendem a se aglomerar, formando placas na base da pilha, devido à compactação proporcionada pelo peso próprio, forma geométrica e, possivelmente, agentes aglomerantes, como o melado do caldo da cana-de-açúcar. Durante os ensaios realizados, observou-se tal comportamento, conforme pode ser verificado na Figura 10.

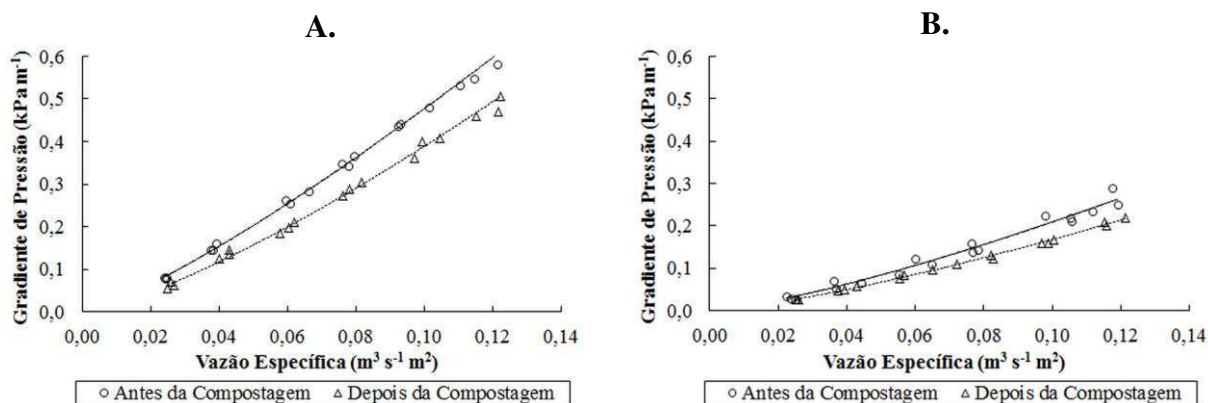


**FIGURA 10.** Formação de placas para o bagaço de cana-de-açúcar quando empilhado.

A palha de café apresentou pequena aglomeração depois de umedecida, o que pode ser decorrente da ação da mucilagem presente na casca dos frutos, entretanto, não foi observado a formação de placas semelhante às observadas na camada de bagaço de cana-de-açúcar. Em relação à serragem de madeira, esta não apresentou aglomeração e formação de placas, mesmo depois de umedecida.

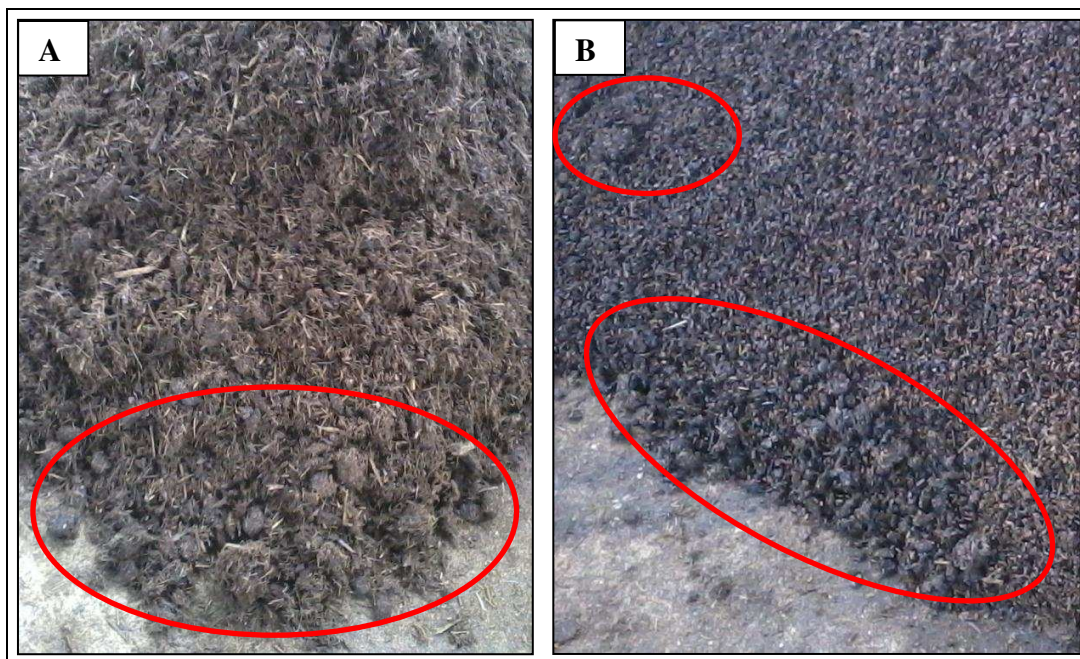
### 4.3. INFLUÊNCIA DA COMPOSTAGEM NO GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR

O comportamento do gradiente de pressão estática do ar, ao ser forçado em camadas de mistura de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café, antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, estão apresentados na Figura 11.



**FIGURA 11.** Gradiente de pressão estática do ar em camadas de cama de frango misturada com bagaço de cana-de-açúcar (A) ou palha de café (B), antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, em função da vazão específica de ar.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 11, para uma mesma vazão específica, verifica-se que o processo de compostagem contribuiu para redução no gradiente de pressão estática do ar ao atravessar as camadas de materiais provenientes das misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café. Apesar de ter ocorrido aumento na massa específica do material orgânico com o tempo de compostagem (Tabela 4), a queda na pressão estática do ar ao atravessar a camada de material, não aumentou conforme tem sido observado para grãos (GRATÃO, 2012). Acredita-se que um dos principais motivos para isso seja a tendência de estruturação do material na forma de grânulos, os quais proporcionam a formação de grande espaço poroso e, com isso pequena resistência à passagem do ar através do material. Na Figura 12 é possível visualizar as condições físicas do material mais estruturado, ao final do período de degradação ativa, sendo a melhoria na estrutura física do material a responsável pela menor queda na pressão estática do ar quando insuflado numa camada do mesmo.



**FIGURA 12.** Formação de aglomerados granulares na mistura de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar (A) ou palha de café (B), depois de ter sido submetido ao processo de compostagem.

O conhecimento da variação do gradiente de pressão estática do ar ao longo do processo de compostagem é essencial no dimensionamento de sistemas de aeração, pois o ventilador deverá ser selecionado visando atender aos requisitos de pressão e vazão de ar, do início ao final do processo.

O gradiente de pressão estática do ar, ao longo do processo de compostagem, não apresentou grande variação, corroborando com os resultados obtidos por Matos *et al.* (2012) os quais relatam que diferenças no gradiente de pressão obtidos ao longo do processo de compostagem podem ser negligenciadas para vazões específicas menores que  $0,16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , desse modo, o conhecimento do gradiente de pressão no início do processo é suficiente para o dimensionamento de sistemas de aeração, uma vez que a máxima vazão de ar a ser fornecida pelo sistema, coincide com o início do processo, quando o material está sob fase de degradação termofílica, e os microrganismos necessitam de maiores concentrações de oxigênio para degradar o material orgânico.

O gradiente de pressão estática do ar, observado na mistura de bagaço de cana-de-açúcar com cama de frango, no início do processo de compostagem, variou de 79 a  $581 \text{ Pa m}^{-1}$ , para vazões específicas de 0,024 a  $0,121 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , sendo verificado ao final do processo, gradiente de pressão estática do ar de 56 a  $507 \text{ Pa m}^{-1}$ , para vazões específicas de 0,025 a  $0,122 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Em relação à palha de café misturada com cama de frango, o gradiente de pressão estática do ar, no início do processo de compostagem, variou de 28 a 290 Pa m<sup>-1</sup>, para vazões específicas de 0,025 a 0,118 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, e, no final do processo, de 27 a 218 Pa m<sup>-1</sup>, para vazões específicas de 0,025 a 0,121 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. Paiva (2011), monitorando o gradiente de pressão estática do ar, na compostagem de carcaças de frango em sistemas de leiras estáticas aeradas, após 42 dias de compostagem, obteve para vazões específicas de ar de 0,06; 0,10 e 0,15 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, gradientes de pressão de 299; 326 e 370 Pa m<sup>-1</sup>, respectivamente. Moreira *et al.* (2008) e Silva *et al.* (2008) verificaram que o gradiente de pressão estática do ar quando insuflado em camada de bagaço de cana-de-açúcar misturado com cama de frango, após 30 dias de compostagem, ficou entre 36 a 356 Pa m<sup>-1</sup>, para a vazões específicas entre 0,79 a 2,67 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>. Os mesmos autores verificaram que o tempo de degradação bioquímica do material orgânico aumentou o gradiente de pressão estática do ar ao atravessá-lo, no entanto isso foi verificado quando analisado o material submetido a 30, 60 e 90 dias de compostagem. Matos *et al.* (2012), não verificaram aumento no gradiente de pressão estática do ar em função do tempo de compostagem, para palha de café misturada com cama de frango. Segundo os autores a alteração do formato das partículas do material orgânico com a degradação bioquímica, resultou na granulação do material, forma estrutural que proporcionou menor resistência ao escoamento do ar.

Os dados de gradiente de pressão e vazão específica de ar foram ajustados aos modelos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter, para o material, antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, para os quais foram calculados os respectivos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), erro médio relativo (P), e desvio padrão da estimativa (S<sub>y</sub>), apresentados na Tabela 7.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 7, verifica-se que as equações ajustadas segundo o modelo de Shedd foram as que melhor representaram o fenômeno em estudo, por apresentarem maiores coeficientes de determinação e menores valores para o erro médio relativo e desvio padrão da estimativa. No entanto, os modelos de Hukill & Ives e Hunter também apresentaram resultados satisfatórios, podendo ser utilizados para representar o fenômeno em estudo.

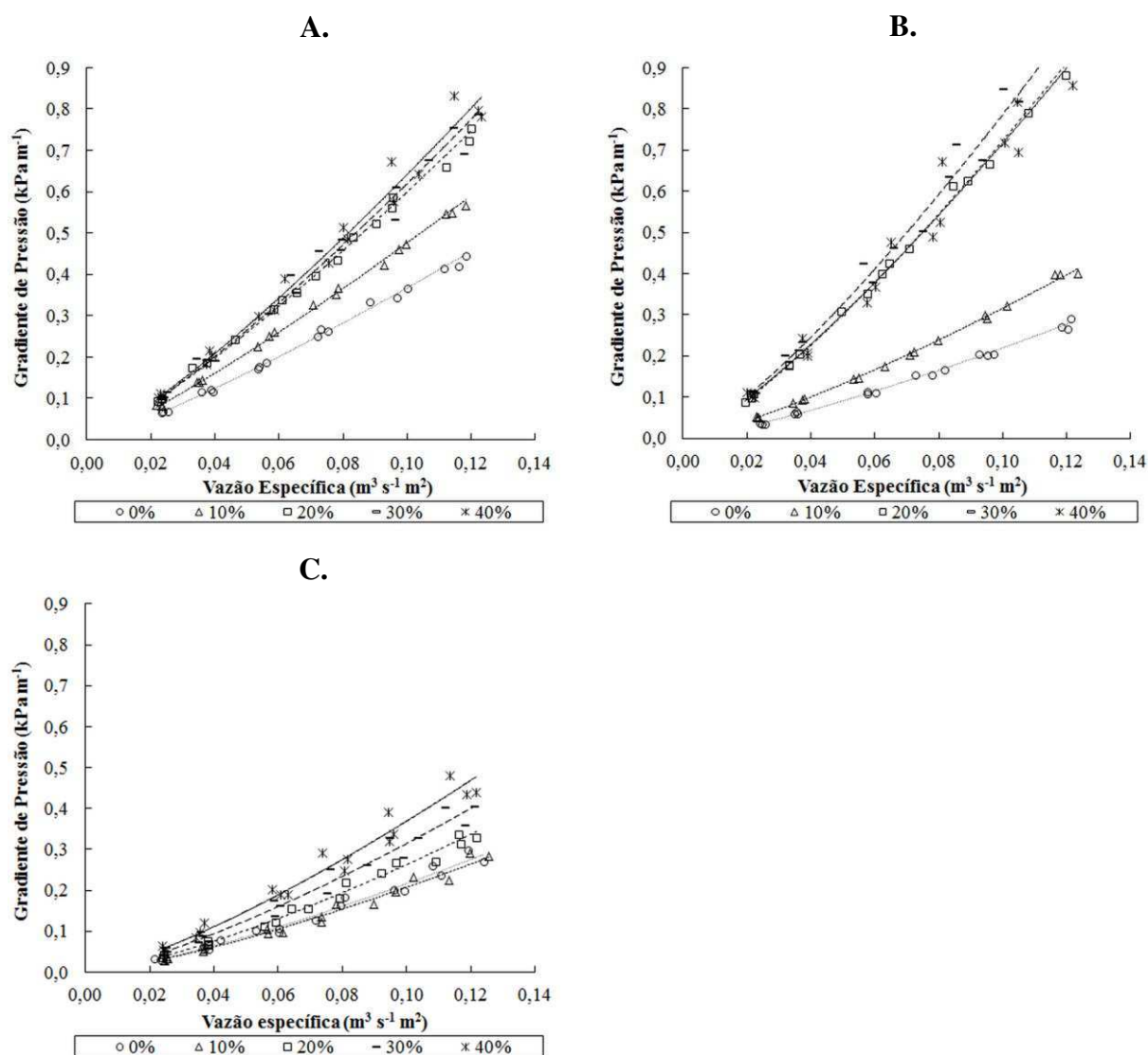
**TABELA 7.** Parâmetros obtidos no ajuste do gradiente de pressão estática ( $\text{kPa m}^{-1}$ ) e vazão específica do ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) aos modelos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter, para as misturas de cama de frango com bagaço de cana-de-açúcar ou palha de café, antes e depois de terem sido submetidos à compostagem.

Material	Cama de Frango (%) <sup>a</sup>	Estádio da compostagem	Modelo	A	B	R <sup>2</sup>	P	S <sub>y</sub>
Bagaço de cana + Cama de Frango	11	Antes	Shedd	7,244	1,186	0,998	3,23	7,8
			Hukill & Ives	24,987	7,007	0,997	4,67	10,2
			Hunter	3,637	10,645	0,996	4,89	10,5
		Depois	Shedd	6,929	1,255	0,996	4,28	10,2
			Hukill & Ives	28,915	11,274	0,994	5,47	11,5
			Hunter	2,663	11,616	0,994	5,72	11,8
Palha de café + Cama de frango	8	Antes	Shedd	4,434	1,324	0,976	9,41	13,5
			Hukill & Ives	21,677	18,150	0,976	9,96	13,5
			Hunter	1,271	8,194	0,976	10,13	13,5
		Depois	Shedd	3,472	1,316	0,998	2,50	3,3
			Hukill & Ives	16,713	17,210	0,998	3,70	3,3
			Hunter	1,030	6,369	0,997	4,04	3,3

Em que, <sup>a</sup> proporção de cama de frango na mistura em base volumétrica.

#### 4.4. INFLUÊNCIA DA CAMA DE FRANGO NO GRADIENTE DE PRESSÃO ESTÁTICA DO AR

Diferentes proporções de cama de frango é adicionada a agentes estruturantes e fontes de carbono, visando-se alcançar uma relação C/N ideal para início do processo de compostagem. Sendo a queda na pressão estática do ar forçado em uma camada de material orgânico, função das características físicas do material, obteve-se o gradiente de pressão estática do ar em função da vazão específica, para as proporções de 0; 10; 20; 30 e 40% de cama de frango em relação ao bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira e palha de café, conforme apresentado na Figura 13.



**FIGURA 13.** Gradiente de pressão estática do ar em camadas de cama de frango, em diferentes proporções, com bagaço de cana-de-açúcar (A); serragem de madeira (B) ou palha de café (C), em função da vazão específica de ar.

Os menores valores de gradientes de pressão estática do ar foram obtidos em camadas de agentes estruturantes sem adição de cama de frango (0% proporção) e os maiores gradientes obtidos nas camadas constituídas pela mistura com cama de frango na proporção de 40%. Inicialmente, esperava-se acréscimo gradual no gradiente de pressão estática do ar com o aumento na quantidade de cama de frango adicionada, no entanto, apesar de ter sido observado maior decréscimo na pressão estática do ar em camadas contendo maiores proporções de cama de frango, o gradiente de pressão não aumentou de forma linear à proporção de cama de frango na mistura.

O gradiente de pressão estática do ar observado na camada de bagaço de cana-de-açúcar sem adição de cama de frango variou de  $66 \text{ Pa m}^{-1}$ , para vazão específica de  $0,023 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , a  $444 \text{ Pa m}^{-1}$ , para vazão específica de  $0,118 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Moreira *et al.* (2008) encontraram em camadas constituídas apenas por bagaço de cana-de-açúcar, gradiente de pressão variando de  $3,8$  a  $65 \text{ Pa m}^{-1}$ , para vazões específicas de  $0,59$  a  $2,78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Apesar dos menores valores de vazão específica utilizados neste trabalho, verifica-se que os valores de gradiente de pressão estática do ar foram superiores aos obtidos por outros autores, provavelmente devido às diferenças na granulometria e no conteúdo de água nos materiais. O conteúdo de água no bagaço de cana-de-açúcar utilizado por Moreira *et al.* (2008) e o utilizado neste trabalho foram, respectivamente, de  $7,4$  e  $64 \text{ dag kg}^{-1}$  (b.u), ou seja, muito diferentes e isso certamente influenciou nos resultados obtidos. Sabe-se que o bagaço de cana-de-açúcar contendo maior conteúdo de água está mais propício à compactação quando empilhado, o que resulta em maior queda na pressão estática do ar nele insuflado.

Camadas constituídas exclusivamente por serragem de madeira apresentaram gradiente de pressão estática do ar variando de  $34$  a  $291 \text{ Pa m}^{-1}$ , para vazões específicas de  $0,025$  a  $0,121 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Yazdanpanah *et al.* (2011), estudando o escoamento do ar ao atravessar uma camada de *pellets* de madeira com dimensões de  $6 \text{ mm}$  de diâmetro e comprimento variando entre  $4$  e  $6,7 \text{ mm}$ , encontraram, para vazões específicas de  $0,02$  a  $0,12 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , gradientes de pressão estática de  $16$  a  $143 \text{ Pa m}^{-1}$ . Os menores valores de gradiente de pressão estática do ar, obtidos por esses autores, quando comparados aos obtidos neste trabalho, em camadas constituídas exclusivamente por serragem de madeira, pode ter sido proveniente da estrutura física dos *pellets*, que não se compactam na mesma magnitude que a serragem de madeira quando empilhada, e à maior quantidade de finos presentes na serragem.

Yazdanpanah *et al.* (2010) verificaram aumento no gradiente de pressão estática do ar com o aumento na proporção de finos em camadas de *pellets*. Os autores trabalharam com

vazões específicas de ar variando de 0,004 a 0,357 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> e encontraram gradientes de pressão estática do ar de 2 a 271 Pa m<sup>-1</sup>, para 0% de finos; 4 a 400 Pa m<sup>-1</sup>, para 5%; 5 a 1100 Pa m<sup>-1</sup>, para 10%; e 8 a 1800 Pa m<sup>-1</sup>, para 20% de finos. O aumento no gradiente de pressão estática do ar com o aumento na quantidade de finos foi atribuído à redução na porosidade do material e, conseqüentemente, redução na sua permeabilidade.

De maneira semelhante ao realizado para o material antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem, os dados de gradiente de pressão estática e vazão específica de ar, para as diferentes proporções de cama de frango adicionadas aos agentes estruturantes, foram ajustados aos modelos de Shedd, Hukill & Ives e Hunter. Os valores de R<sup>2</sup>, P e S<sub>y</sub> obtidos para o modelo de Shedd variaram de 0,97 a 0,99; 1,73 a 9,78% e 5,4 a 50 Pa m<sup>-1</sup>, respectivamente, para as diversas proporções. Para modelo de Hukill & Ives, esses valores variaram de 0,97 a 0,99; 2,19 a 10,76% e 5,8 a 51 Pa m<sup>-1</sup>, enquanto para o modelo de Hunter os valores variaram de, 0,97 a 0,99; 2,59 a 11,17% e 6 a 51 Pa m<sup>-1</sup>, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos, pode-se afirmar que embora todos os três modelos possam ser utilizados para descrever o gradiente de pressão estática do ar ao ser insuflado em camadas de resíduos orgânicos, o modelo de Shedd foi o que apresentou os maiores valores para o coeficiente de determinação e menores valores para o erro médio relativo e desvio padrão da estimativa. Assim, pode ser considerado o melhor modelo para representar o gradiente de pressão estática do ar quando insuflado em camadas de resíduos orgânicos, para todas as proporções de cama de frango utilizadas.

Após selecionado o modelo, houve o interesse em verificar se as curvas de gradiente de pressão estática como função da vazão específica de ar, obtidas para camadas de materiais com diferentes proporções de cama de frango, possuíam características estatisticamente similares. Dessa forma, utilizou-se a análise de agrupamento, tendo os parâmetros das regressões como variáveis dependentes, para determinar quais proporções apresentaram curvas similares. Na Tabela 8 estão apresentados os parâmetros do modelo de Shedd, obtidos com dados de gradientes de pressão estática e vazão específica de ar, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher para os parâmetros médios estimados.

**TABELA 8.** Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados (A, B) para o modelo de Shedd, ajustado aos dados de gradiente de pressão estática ( $\text{kPa m}^{-1}$ ) em função da vazão específica de ar ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

Material	Grupo	Cama de Frango (%) <sup>a</sup>	A	B	R <sup>2</sup>
Bagaço de cana + Cama de frango	1	0	5,136	1,149	0,997
		10	6,753	1,155	0,999
		Modelo comum	6,022	1,157	0,931
	2	20	8,983	1,179	0,998
		30	9,096	1,172	0,987
		Modelo comum	9,083	1,177	0,991
3	40	10,317	1,207	0,983	
Serragem + Cama de frango	1	0	4,007	1,263	0,995
		10	5,838	1,266	0,998
		Modelo Comum	4,938	1,267	0,883
	2	20	12,523	1,241	0,998
		30	13,429	1,235	0,986
		Modelo Comum	12,839	1,233	0,986
3	40	11,841	1,218	0,973	
Palha de café + Cama de frango	1	0	4,698	1,335	0,979
		10	5,007	1,379	0,979
		Modelo Comum	4,858	1,357	0,978
	2	20	5,513	1,324	0,988
		30	6,157	1,293	0,972
		3	40	6,621	1,257
Modelo Comum	6,307	1,269	0,948		

Em que, <sup>a</sup> proporção de cama de frango na mistura em base volumétrica.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 8, verifica-se que as diferentes proporções de cama de frango na mistura com bagaço de cana-de-açúcar resultaram em três diferentes grupos de equações ajustadas para estimativa do gradiente de pressão estática do ar. O grupo 1 foi constituído pela união das equações obtidas para estimativa do gradiente de pressão estática do ar forçado em camadas constituídas por bagaço de cana-de-açúcar, contendo as proporções de 0% e 10% de cama de frango, originando um modelo comum capaz de explicar a variação nesse quesito. Já o grupo 2 foi formado pelas equações de estimativa do gradiente de pressão estática do ar insuflado em camadas de misturas de bagaço de cana-de-açúcar contendo proporções de 20 e 30% de cama de frango, resultando em outro

modelo comum, enquanto o grupo 3 é formado pela equação obtida quando a proporção de cama de frango na mistura foi de 40%.

Os grupos para a serragem de madeira como material estruturante foram semelhantes aos formados para o bagaço de cana-de-açúcar, tendo sido ajustado um modelo comum para os grupos de equações 1 e 2, permanecendo o grupo 3 constituído apenas pela equação ajustada para a proporção de 40% de cama de frango na mistura.

No que se refere à palha de café como material estruturante, a formação dos grupos diferiram em relação ao que foi verificado para os outros resíduos, sendo o grupo 1 formado pelo agrupamento das equações de estimativa do gradiente de pressão estática do ar quando insuflado em camadas constituídas por misturas nas proporções de 0 e 10% de cama de frango, o grupo 2 formado somente pela equação de mistura de cama de frango na proporção de 20%, e o grupo 3 formado pelo agrupamento das equações ajustadas para misturas de 30 e 40% de cama de frango.

Os resultados obtidos neste trabalho indicaram que, à medida que é aumentada as proporções de agente estruturante em uma massa em compostagem, menor a queda na pressão estática do ar ao atravessar a camada de material, em decorrência do aumento na porosidade e permeabilidade do material à passagem do ar, corroborando com Li *et al.* (2013) e McGuckin *et al.* (1999).

Observa-se uma variação considerável no gradiente de pressão estática do ar em relação ao tipo de resíduo utilizado como agente estruturante e fonte de carbono, principalmente quando se analisa a palha de café em relação ao bagaço de cana-de-açúcar e a serragem de madeira. Como a cama de frango adicionada aos três resíduos possuía as mesmas características, a única diferenciação em termos físicos, foi proveniente do agente estruturante. Cada agente estruturante possui uma característica física própria, como por exemplo, forma geométrica, massa específica, resistência à compactação e tamanho de partícula. Um agente estruturante ideal deve apresentar características físicas que proporcionem maior porosidade ao meio e, conseqüentemente, menor resistência à passagem do ar.

Raichura e Maccartney (2006), citados por Li *et al.* (2013), recomendaram a utilização de agentes estruturantes com variados tamanhos de partícula para facilitar a aeração do material. Segundo os autores partículas de menor dimensão podem se aglomerar e formar estruturas de grande espaço poroso, além de homogeneidade em relação ao tamanho de poros, melhorando a distribuição do ar e a eficiência do processo. Em relação aos agentes

estruturantes utilizados neste trabalho, o bagaço de cana-de-açúcar foi o que apresentou maior gradiente de pressão estática do ar e maior uniformidade no tamanho de partículas, por apresentar variação unidimensional no seu tamanho, devido à forma geométrica das fibras. No que se refere à serragem de madeira, verifica-se variação bidimensional na geometria das partículas, por se tratar de raspas que possuem aproximadamente a mesma espessura, havendo variação apenas nas dimensões comprimento e largura. Em relação à palha de café, observa-se variação tridimensional, devido à forma esférica e elipsoidal das partículas, sendo, esse, o agente estruturante que apresentou menor gradiente de pressão estática do ar. Com isso, considera-se coerente associar desuniformidade nas três dimensões das partículas como característica diretamente associada à permeabilidade e, conseqüentemente menor queda na pressão estática do ar em escoamento através da camada do material.

À medida que aumenta a quantidade de agente estruturante em uma massa em compostagem, espera-se aumento na porosidade e permeabilidade do material à passagem do ar (LI *et al.*, 2013), o que foi observado neste trabalho. Maiores proporções de agente estruturante resultaram em menor queda na pressão estática do ar ao atravessar o material. McGuckin *et al.* (1999), estudando a queda na pressão estática do ar ao passar por uma camada de resíduos de vegetais, observaram que o aumento da proporção de agentes estruturantes levou ao aumento da permeabilidade do material e, conseqüentemente, redução na queda de pressão estática do ar.

GRATÃO (2012) observou que o aumento de impurezas na massa de grãos de quinoa contribuiu para o decréscimo da sua massa específica e, conseqüentemente, aumento na porosidade, reduzindo a resistência ao escoamento do ar ao passar pela camada desses grãos.

#### 4.5. DEMANDA DE POTÊNCIA DOS VENTILADORES

Dada à grande variabilidade existente em sistemas de compostagem por leiras estáticas aeradas, foi calculada neste trabalho apenas a potência demandada pelo ventilador para vencer a queda na pressão estática do ar imposta pela camada de material, sabendo-se que as quedas provenientes de outros componentes do sistema de aeração também devam ser consideradas.

A potência demandada para aeração das misturas de bagaço de cana-de-açúcar, serragem de madeira ou palha de café com cama de frango, nas proporções, em termos de volume, de 8,1:1; 6,1:1 e 11,5:1, respectivamente, considerando-se uma camada de 1 m de altura, taxa de aeração de  $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$  (PINTO, 2001) e rendimento do ventilador de 60%, está apresentada na Tabela 9.

**TABELA 9.** Demanda de potência do ventilador para aeração do material antes e depois de ter sido submetido ao processo de compostagem.

Resíduo	Estádio da Compostagem	Potência Demandada ( $\text{W t}^{-1}$ )
Bagaço de cana + Cama de frango	Antes	72
	Depois	62,9
Serragem + Cama de frango	Antes	104,7
Palha de café + Cama de frango	Antes	37,1
	Depois	35,1

Os valores de demanda de potência apresentados na Tabela 9, podem variar em função das características construtivas do ventilador, desse modo, recomenda-se em projetos de sistemas de compostagem aerada, a escolha do ventilador pelo catálogo do fabricante, o qual leva em consideração a vazão e pressão estática do ar a serem fornecidos pelo mesmo.

Moreira *et al.* (2008), considerando a taxa de aeração de  $1200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ t}^{-1}$  recomendada por Pinto (2001), na aeração de cama de frango misturado com bagaço de cana-de-açúcar, verificaram que a demanda de potência requerida pelo ventilador, aos 30 dias de compostagem do material, em camada de 1 m de altura, foi de  $44,2 \text{ W t}^{-1}$ . Matos *et al.* (2012), obtiveram para aeração de cama de frango misturada com palha de café, antes do material ser submetido ao processo de compostagem, demanda de potência de  $1,2 \text{ W t}^{-1}$ , para camada com 1 m de espessura. Paiva (2011), utilizando leiras estáticas aeradas na compostagem de carcaças de frango juntamente com palha de café e cama de frango, obteve demanda de potência média de  $274 \text{ W t}^{-1}$ , ao longo do processo de compostagem, em camadas com espessura de 1,0 m. Nesse experimento, foram monitoradas 3 leiras estáticas aeradas, sendo a

demanda de potência máxima observada para cada leira de 574,8; 513,8 e 329 W t<sup>-1</sup>. A demanda de potência obtida neste trabalho está condizente com os valores encontrados na literatura, dada a grande variabilidade nas características dos resíduos utilizados, porém, todos os valores estão abaixo de 820,6 W t<sup>-1</sup>, valor citado por Pinto (2001) para a compostagem aerada de lodo de esgoto.

O conhecimento da potência demandada pelo ventilador ao longo do processo de compostagem é essencial no dimensionamento do sistema de aeração, uma vez que influencia diretamente na eficiência do processo e no consumo de energia (ALMEIDA *et al.*, 2012). O processo de compostagem contribuiu para redução da potência demandada pelo ventilador. Acredita-se que um dos principais motivos para isso seja a tendência de estruturação do material na forma de grânulos, os quais proporcionam a formação de grande espaço poroso e, com isso pequena resistência à passagem do ar através do material.

## 5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

O valor da queda na pressão estática do ar aumentou de forma potencial com a espessura da camada de material, sendo a mistura que teve o bagaço de cana-de-açúcar como agente estruturante, a que proporcionou maior queda na pressão estática do ar.

O processo de compostagem contribuiu para redução no gradiente de pressão estática do ar ao atravessar as camadas de material orgânico.

Todos os modelos matemáticos analisados podem ser utilizados para descrever o gradiente de pressão estática do ar, ao ser insuflado em camadas de resíduos orgânicos, no entanto, o de Shedd pode ser considerado, em termos estatísticos, o que melhor representou o fenômeno em estudo.

O gradiente de pressão estática do ar aumentou com o acréscimo de cama de frango aos agentes estruturantes e fontes de carbono.

Equações obtidas para estimativa do gradiente de pressão estática do ar, para diferentes proporções de cama de frango, podem ser agrupadas, originando modelos capazes de prever a variação no gradiente de pressão para cada agente estruturante e fonte de carbono.

## 6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P.; SILVEIRA, A.; MIGUEL, A. F. Applicability of the Forchheimer equation for forced-aeration windrow composting: variation of airflow characteristics with humidity and volatile solids. *Fluid Mechanics Research*, v. 39, p. 149-159, 2012.

ASAE Standards (ASAE D272.3). Resistance to airflow of grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2007. 8p.

AZEVEDO, M. A. Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras. 1993. 230p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1993.

BARRINGTON, S.; DENIS, C.; MAHER, T.; ANDWILLIAM, K. Compost Airflow Resistance. *Biosystems Engineering*, v. 81, n. 4, p. 433-441, 2002.

BIAGGIONI, M. A.; PIZA, P. L. T.; FERREIRA, W. A. Queda de pressão estática por meio de uma coluna de noz macadâmia. *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 2, p. 499-507, 2005.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 28, de 27 de julho de 2007. Aprova os métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organo-minerais e corretivos, disponíveis na Coordenação-Geral de Apoio Laboratorial - CGAL/SDA/MAPA, na Biblioteca Nacional de Agricultura - BINAGRI e no sítio do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 31 jul. 2007. Seção 1, p.11.

BRASIL. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2010.

COELHO, L. I. G. D. Compostagem de resíduos agroindustriais: Monitorização do processo e avaliação da qualidade do composto. 2007. 98p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Sustentável) - Universidade do Algarve, Faro, 2007.

COELHO, C.; CAVANI, L.; HALLE, A. T.; GUYOT, G.; CIAVATTA, C.; RICHARD, C. Rates of production of hydroxyl radical and singlet oxygen from irradiated compost. *Chemosphere*, v. 85, p. 630-636, 2011.

DAY, M.; SHAW, K. Processos Biológicos, químicos, físicos del compostaje. In: STOLLELLA, P.; KAHN, B. Utilización de compost en sistemas de cultivo hortícola. Ediciones Mundi-Prensa, 2005. p. 17-50.

DIAZ, M. J.; MADEJON, E.; LOPEZ, F.; LOPEZ, R.; CABRERA, F. Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochemistry*, v. 37, n. 1, p. 143-150, 2002.

DIAZ, L. F.; SAVAGE, G. M.; EGGERTH, L. L.; CHIUMENTI, A. Systems used in composting. In: DIAZ, L. F., et al. *Waste Management Series*. Elsevier, v. 8, 2007. Cap. 5, p. 67-87.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (EPA). Draft guidelines for composting works in south Australia. Australia, 2007. Disponível em:

[http://www.epa.sa.gov.au/pdfs/composting\\_guidelines.pdf](http://www.epa.sa.gov.au/pdfs/composting_guidelines.pdf) . Acesso em: 21/12/12.

GOLUEKE, C. G. *Composting: A Study of the Process and its Principles*. Emmaus, Pa: Rodale Press, 1973.

GOMES, A. P. O. Monitorização de uma instalação laboratorial de compostagem. 2011. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de Coimbra, Portugal, 2011.

GRATÃO, P. T. S. Perda de pressão estática em uma coluna de grãos de quinoa (*Chenopodium quinoa Willdenow*) e análise por elementos finitos. 2012. 54p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 2012.

GRAVES, R. E. Composting. In: United States Department of Agriculture, natural resources conservation service. Part 637 Environmental Engineering - National Engineering Handbook. Washington, 2000. 88p. Disponível em: <http://www.info.usda.gov/CED/>. Acesso em: 25/07/2013.

HAUG, R. T. *The practical handbook of compost engineering*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 717 p.

HUET, J.; DRUILHE, C.; TRÉMIER, A.; BENOIST, J. C.; DEBENEST, G. The impact of compaction, moisture content, particle size and type of bulking agent on initial physical properties of sludge-bulking agent mixtures before composting. *Bioresource Technology*, v. 114, p. 428-436, 2012.

HUKILL, W. V.; IVES N. C. Radial airflow resistance of grain. *Agricultural Engineering*, v. 36, p. 332-335, 1955.

HUNTER, A. J. Pressure difference across an aerated seed bulk for some common duct and store cross-sections. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v. 28, n. 5, p. 437-450, 1983.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012. 134p.

KEENER, H. M.; ELWELL, D. L.; EKINCI, K.; HOITINK, H. A. J. Composting and value-added utilization of manure from a high-rise. *Compost Science and Utilization*, v. 9, n. 4, p. 312-321, 2001.

KIEHL, E. J. Fertilizantes orgânicos. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KULCU, R.; YALDIZ, O. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural waste. *Bioresource Technology*, v. 93, p. 49-57, 2004.

LASHERMES, G.; BARRIUSO, E.; HOUOT, S. Dissipation pathways of organic pollutants during the composting of organic wastes. *Chemosphere*, v. 87, p. 137-143, 2012.

LETON, T. G.; STENTIFORD, E. I. Control of aeration in static pile composting. *Waste Management & Research*, v. 8, n. 4, p. 299-306, 1990.

LI, W. Generalized equation for airflow resistance of bulk grains with variable density, moisture content and fines. *Drying Technology*, v. 12, n. 3, p. 649-667, 1994.

LI, Z.; LU, H.; REN, L.; HE, L. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere*, v. 93, p. 1247-1257, 2013.

MATOS, A. T.; VIDIGAL, S. M.; SEDIYAMA, M. A. N.; GARCIA, N. C. P.; RIBEIRO, M. F. Compostagem de alguns resíduos orgânicos utilizando-se águas residuárias da suinocultura como fonte de nitrogênio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 199-203, 1998.

MATOS, A. T. Qualidade do Meio Físico - Práticas de laboratório. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. 150 p.

MATOS, A. T.; TEIXEIRA, D. L.; RIBEIRO, I. C.; PAIVA, E. C. R.; LACERDA FILHO, A. F. Demanda de potência do ventilador para aeração de material em compostagem. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 3, p. 542-551, 2012.

MATOS, A. T. Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos. Viçosa, MG: Editora UFV, 2014. 241 p.

McCGUCKIN, R. L.; EITEMAN, M. A.; DAS, K. Pressure drop through raw food waste compost containing synthetic bulking agents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, New York, v. 72, n. 4, p. 375-384, 1999.

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

MOREIRA, D. A.; MATOS, A. T.; SARTORI, M.; SILVA, N. C. L.; BARROS, R. T. P.; LUÍS, F. A. R. Perda de carga no fluxo de ar forçado em colunas de material orgânico com diferentes profundidades e estádios de degradação bioquímica. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v. 16, p. 238-247, 2008.

NAVARRO, S.; NOYES, R. *The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002. 647 p.

NEGRO, M. J.; SOLANO, P. C.; CARRASCO, J. Composting of sweet sorghum bagasse with other wastes. *Bioresource Technology*, v. 67, p. 89-92, 1999.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Compostagem da fração sólida da água residuária de suinocultura. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 483-491, 2009.

PAIVA, E. C. R. Avaliação da compostagem de carcaças de frango pelos métodos da composteira e leiras estáticas aeradas. 2008. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

PAIVA, E. C. R. Variáveis de projeto, operação de sistemas de leiras estáticas aeradas e qualidade do composto produzido com carcaças de aves mortas. 2011. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

PEREIRA NETO, J. T.; STENTIFORD, E. I.; MARA, D. D. Sistemas de compostagem por pilhas estáticas arejadas - uma alternativa de baixo custo ao tratamento e reciclagem do lixo

urbano e lamas de esgotos domésticos. Informação APESB, (29), Lisboa, Portugal, 1986. p. 3-19.

PEREIRA NETO, J. T. On the treatment of municipal refuse and sewage sludge using aerated static pile composting - A low cost technology approach. 1987. 272p. Tese (Doutorado) – University of Leeds, Leeds, 1987.

PEREIRA NETO, J. T. Compostagem: Fundamentos e Métodos. 1º Simpósio Sobre Compostagem: Ciência e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, 18 a 19 de Agosto de 2004 – FCA – GEMFER.

PEREIRA NETO, J. T. Manual de compostagem, Processo de baixo custo. Viçosa, MG: Editora UFV, 2007. 81 p.

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

POS, J. Composting-theoretical applications, municipal and commercial composting workshop, University of Guelph, 1991.

RASAPOOR, M.; NASRABADI, T.; KAMALI, M.; HOVEIDI, H. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. Waste Management, v. 29, p. 570-573, 2009.

RAY, S. J.; PORDESIMO, L. O.; WILHELM, L. R.; BUSCHERMOHLE, M. J. Airflow resistance of some pelleted feed. Transactions of the ASAE, v. 47, n. 2, p. 513-519, 2004.

RICHARD, T. L.; VEEKEN, A. H. M.; WILDE, V.; HAMELERS, H. V. M. Air-Filled Porosity and Permeability Relationships during Solid-State Fermentation. Biotechnol. Prog, v. 20, p. 1372-1381, 2004.

SAINT-JOLY, C.; PEYRE, A.; BOCHU, J. L.; N'DAO, O. Pressure Losses During Ventilation of Manure. Biological Wastes, England, v. 30, p. 123-132, 1989.

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

SILVA, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

SILVA, N. C. L.; MATOS, A. T.; SARTORI, M. A.; MOREIRA, D. A.; BARROS, R. T. P.; LUIZ, F. A. R. Variação na pressão estática de ar insuflado em diferentes vazões específicas em colunas de material orgânico com diferentes estádios de degradação bioquímica. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 30, n. 2, p. 165-170, 2008.

STENTIFORD, E. I.; PEREIRA NETO, J.T.; MARA, D.D. Diversity of composting system. In: *Low cost composting – Research Monographs in Tropical Public Health Engineering*. University of Leeds, Edited by D. D. Mara. March, 1996.

TANG, Z.; YU, G. H.; LIU, D. Y.; XU, D. B.; SHEN, Q. R. Different analysis techniques for fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy to assess compost maturity. *Chemosphere*, v. 82, p. 1202-1208, 2011.

WILEY, J. S.; PIERCE, G. W. A preliminary study of high rate composting. In: *Proc. Am. Soc. Civil Engineering*, paper nº: 846.81, 1955. p. 1-28.

YANG, F.; LI, G. X.; YANG, Q. Y.; LUO, W. H. Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*, v. 93, p. 1393-1399, 2013.

YAZDANPANA, F.; SOKHANSANJ, S.; LAU, A. K.; LIM, C. J.; BI, X.; MELIN, S. Airflow versus pressure drop for bulk wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 1960-1966, 2011.

YAZDANPANA, F.; SOKHANSANJ, S.; LAU, A. K.; LIM, C. J.; BI, X.; MELIN, S.; AFZAL, M. Permeability of wood pellets in the presence of fines. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 5565-5570, 2010.

YUE, B.; CHEN, T. B.; GAO, D.; ZHENG, G. D.; LIU, B.; LEE, D. J. Pile settlement and volume reduction measurement during forced-aeration static composting. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 7450-7457, 2008.