

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente

NECESSIDADES DE AREJAMENTO NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Vânia Cristina da Conceição Paulino Coucello

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária

Orientação Científica:

Professora Doutora Ana Isabel Espinha da Silveira

Lisboa

2009

Aos meus pais

Ao meu irmão

Ao Daniel

Agradecimentos

À Professora Doutora Ana Isabel Espinha da Silveira pela orientação desta dissertação. Agradeço o seu apoio, incentivo e acompanhamento que foram determinantes na resolução deste trabalho.

À Luságua, pela possibilidade de enquadramento no projecto de parceria com a Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Marco Baptista e ao Engenheiro Pedro Almeida pela troca de informação e disponibilidade no esclarecimento de dúvidas que ajudaram na conclusão da dissertação.

À Engenheira Maria José Correia pelo dedicação, paciência, bom humor, amizade e apoio ao longo dos meses de trabalho no laboratório.

Às colegas Cidália Teixeira e Dina António pelo esforço, companheirismo e cooperação que foi essencial a este trabalho, mas principalmente pelo óptimo ambiente de trabalho e pela amizade que se formou no decorrer deste ano.

A todos os meus amigos e colegas, em especial à Ana Potes, à Ana Rita Ferreira, à Cristina Bravo Gomes, ao Gonçalo Angeja e à Susana Ferreira, agradeço a atenção, amizade e força que me deram, devido ao seu apoio foi tudo mais fácil.

Agradeço em especial aos pais, irmão e namorado que foram sempre a fonte de força para chegar ao fim.

Sumário

A presente dissertação teve como principal objectivo a determinação das necessidades de arejamento no processo de compostagem, de lamas digeridas provenientes de suiniculturas.

Foram realizadas três Pilhas no decorrer do trabalho. Procedeu-se ao estudo do efeito do estruturante nas necessidades de arejamento, através da adição de casca de arroz, nas Pilhas 2 e 3.

Para o dimensionamento do arejador aplicou-se o método referido por Haug (1993), onde se determinam as necessidades de arejamento do substrato para a estequiometria da reacção, redução da humidade e controlo da temperatura.

Como método secundário para a determinação das necessidades de arejamento foram ainda efectuadas determinação de PCS (calor) e humidade.

Como método de avaliação do efeito da adição de casca de arroz no substrato e para apoio ao método adoptado para a determinação das necessidades de arejamento recorreu-se ainda à determinação de SV e a testes respirométricos de CO₂.

As necessidades de ar para a estequiometria da reacção, redução da humidade e controlo da temperatura foram afectadas pela adição do estruturante.

O método adoptado permitiu concluir que a necessidade de ar determinante para o processo foi a necessidade de ar para redução da humidade.

Verificaram-se taxas de arejamento iniciais de 30×10^{-3} , 60×10^{-3} e $100 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, nas Pilhas 1, 2 e 3 respectivamente. A adição de estruturante nas Pilhas 2 e 3 influenciou as diferenças obtidas nas taxas de arejamento iniciais. Por ter sido observada a maior redução

de humidade na Pilha 3, foi obtido um valor mais elevado de taxa de arejamento. Depois dos primeiros 15 dias de compostagem seria possível reduzir as taxas de arejamento para metade.

Para a determinação das necessidades de arejamento e para o acompanhamento do processo de compostagem, conclui-se que não existe vantagem na determinação de PCS e que através das taxas respirométricas de CO₂ se obtêm resultados com melhores correlações em relação aos SV.

Abstract

The present dissertation had as main goal the determination of the need for aeration in the composting of digested sludge from pig farms.

During the present work were made three piles. The addition of rice husk in piles 2 and 3 had as goal to study the effect of structural amendment in the need for aeration.

For dimensioning the ventilator it was applied the procedure described by Haug (1993), which determine the need of the substrate for the stoichiometric of the reaction, reducing the humidity and temperature control.

As a secondary method for determining the needs of aeration were made determinations of PCS (heat) and moisture content.

As a method for assessing the effect of the rice husk on the substrate and to support the method proposed by Haug (1993) were determined Volatile Solids (VS) and used a respirometric test based on the CO₂ consumption.

The needs of air for the stoichiometric of the reaction, reducing the humidity and temperature control were affected by the structural amendment.

The method indicated that the need of air determining the process was the need of air to reduce moisture.

There were obtained initial aeration rates of 30×10^{-3} , 60×10^{-3} e $100 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ in piles 1, 2 and 3, respectively. The addition of structure in cells 2 and 3 influenced the differences obtained in the initial rates of aeration. Because it was observed the greatest reduction of

moisture in pile 3, was obtained a higher rate of aeration. After the first 15 days of composting, the aeration rates could be reduced by half.

For determine the needs of air and for monitoring the process of composting, it is concluded that there is no advantage in determining the PCS and that there are achieved better correlations in results obtain through respirometric rates of CO₂ than with results for SV.

Lista de Símbolos e Abreviaturas

A – número de moles de oxigénio consumidas

a_a e b_a – constantes para a água

a_{bc} – tempo referente ao início da ignição

$A_{g_{rem}}$ – água removida

ar_e – ar necessário para satisfazer a necessidade estequiométrica de oxigénio

ar_h – ar necessário para remover a humidade

ar_t – ar necessário para controlar a temperatura

$ar_{e,acumulado}$ - ar necessário para satisfazer a necessidade estequiométrica de oxigénio
acumulado

$ar_{h,acumulado}$ – ar necessário para remover a humidade acumulado

$ar_{t,acumulado}$ – ar necessário para controlar a temperatura acumulado

B – número de moles de CO_2 libertadas

b_{bc} – tempo a que a temperatura alcança 60% de elevação total

b_{cc} – base de cinza constante

C – elemento Carbono

C/N – razão Carbono/Azoto

C_{AB} – calor de combustão do Ácido Benzóico

$C_aH_bO_cN_d$ – composição inicial do substrato

$C_{ar,s}$ – calor do ar seco a 55°C

t_{bc} – tempo após a elevação onde a temperatura se torna constante

CC_{O_2} – calor de combustão, por electrão transferido de oxigénio a uma ligação tipo metano

$CE_{\text{água}}$ – calor específico da água

CE_{ar} – calor específico do ar

$C_{evp,\text{água}}$ – calor utilizado na evaporação da água

$Cinzas_{conservativas}$ – conteúdo em cinzas do substrato no início

CL – calor libertado

$CL_{vp,\text{água}}$ – calor latente de vaporização da água, a 55°C

CO_2 – concentração de CO_2 à saída dos reactores

$CO_{2,0}$ – quantidade máxima acumulada de CO_2

$CO_{2,a}$ – quantidade acumulada de CO_2 produzido

$CV_{20^\circ C}$ – calor de vaporização dos gases de saída a 20°C

$CVA_{20^\circ C}$ – calor de vaporização do ar a 20°C

$C_{vp,ep}$ – calor de vapor da água que entra e do gás que evapora a 55 °C

$C_wH_xO_yN_z$ – composição final do substrato

D – número de moles de H_2O produzidas

dg – degradado

E – número de moles de NH_3 libertadas

e_1 – correcção para o calor de formação do ácido nítrico

e_2 – correcção para o calor de combustão do fio de ignição

e_3 – correcção para o calor de formação de ácido sulfúrico

E_e – a energia que entra no sistema

E_l – energia libertada na reacção

E_s – a energia que sai do sistema

H – elemento Hidrogénio

He – humidade específica

he_e – humidade específica de entrada do sistema

he_s – humidade específica de saída do sistema

HR_{ar} – humidade relativa, da pressão de fracção de vapor de saturação

h_{rem} – humidade removida do sistema, pelos gases de saída

IR – Índice de Respiração

IRD – Índice de Respiração Dinâmico

k_{CO_2} – constante de velocidade de degradação de primeira ordem (CO_2)

k_{SVB} – constante de velocidade de degradação de primeira ordem (SVB)

m_{AB} – massa de amostra de Ácido Benzóico

N – elemento Azoto

n – número de moles formadas de composto

n_{dias} – número de dias de compostagem

$N_{o,c}$ – necessidade de oxigénio para controlar a temperatura

$N_{o,e}$ – necessidade estequiométrica de oxigénio

O – elemento Oxigénio

O_e – oxigénio necessário fornecer ao processo para satisfazer a necessidade estequiométrica

P_a – pressão atmosférica

$P_{água,comp}$ – peso de água no composto

$P_{água,prod}$ – peso de água produzida durante o processo

$P_{água,subs}$ – peso de água no substrato

PCS – Poder Calorífico Superior

$P_{perdida}$ – peso de água perdida

$P_{\text{degradado}}$ – peso do substrato degradado

PE_{ar} – peso específico do ar

P_f – peso final do substrato

$P_{\text{fo,i}}$ – peso da fracção orgânica inicial

P_i – peso inicial do substrato

PM [água] – peso molecular da água

PM [ar seco] – peso molecular do ar seco

PM [O_2] – peso molecular do O_2

$P_{\text{m,o,ar}}$ – percentagem mássica de oxigénio no ar

P_n – peso da pilha, num dado momento, n

ps – peso seco

PSV – pressão de saturação do vapor

PV – pressão de vapor foi corrigida, para a pressão de vapor da água real

Q – calor de combustão teórico

$Q_{\text{ar,r}}$ – caudal de ar, do rector

Q_c – calor de combustão teórico do composto

Q_l – calor libertado, do substrato determinado através do PCS

Q_{latente} – calor latente determinado através do PCS

Q_s – calor de combustão teórico do substrato

R – grau de redução da matéria orgânica

r_1 – taxa de elevação da temperatura durante 5 minutos antes da ignição

r_2 – taxa de elevação da temperatura durante 5 minutos após o tempo c

ST_c – sólidos totais do composto

ST_s – sólidos totais do substrato

SV – teor de sólidos voláteis

SVB – sólidos voláteis biodegradáveis

SVB_0 – quantidade máxima acumulada de SVB

SVB_a – quantidade acumulada de SVB

SVB_r – sólidos voláteis biodegradáveis removidos

SV_c – sólidos voláteis do composto

SV_s – sólidos voláteis do substrato

t – tempo

t_a – temperatura no tempo a

T_a – valor de temperatura absoluta do vapor

$TA_{méd}$ – taxa de arejamento média

$TA_{médE}$ – taxa de arejamento média para satisfazer a necessidade estequiométrica

$TA_{médH}$ – taxa de arejamento média para reduzir a humidade

$TA_{médT}$ – taxa de arejamento média para controlar a temperatura

t_c – temperatura no tempo c

t_{cor} – correcção para a elevação da temperatura

T_e – temperatura de entrada do gás

T_s – temperatura de saída

v_{CO_2} – velocidade de degradação determinada a partir dos valores de CO_2

v_{SVB} – velocidade de degradação determinada a partir dos valores de SVB

W – capacidade calorífica do calorímetro

Índice de Matérias

1. Introdução.....	1
1.1. Aspectos Gerais.....	1
1.2. Objectivos.....	3
2. Plano de Trabalho.....	5
3. Revisão Bibliográfica.....	7
3.1. Processo de Compostagem.....	7
3.2. Sistema de compostagem.....	8
3.3. Parâmetros de Controlo do Processo.....	9
3.3.1. Humidade.....	9
3.3.2. Temperatura.....	11
3.3.3. Porosidade e volume de espaços vazios.....	12
3.3.4. pH.....	13
3.3.5. Relação C/N.....	14
3.3.6. Arejamento.....	15
3.4. Necessidades de arejamento.....	17
3.4.1. Necessidade estequiométrica de ar.....	17
3.4.2. Necessidade de ar para redução da humidade.....	17
3.4.3. Necessidade de ar para o controlo da temperatura.....	18
3.4.4. Taxas de arejamento e picos de arejamento.....	20
3.5. Cinética do processo.....	21
3.6. Balanço energético.....	24
3.7. Estabilidade e maturação do produto composto.....	25
3.8. Testes Respirométricos.....	27
3.9. Estratégias de gestão do ar.....	30
4. Metodologia.....	33
4.1. Delineamento experimental.....	33
4.2. Instalações experimentais.....	34
4.2.1. Instalação piloto à escala real.....	34
4.2.2. Instalação piloto em laboratório.....	36
4.2.3. Substratos.....	36
4.3. Trabalho experimental.....	37
4.3.1. Recolha das amostras.....	37
4.3.2. Preparação das amostras.....	39
4.4. Métodos analíticos.....	40

4.5.	Métodos de cálculo	40
4.5.1.	Determinação da Humidade.....	40
4.5.2.	Determinação do teor de sólidos voláteis.....	41
4.5.3.	Determinação do Poder Calorífico Superior.....	41
4.5.4.	Determinação do teor em Oxigénio	42
4.6.	Desenvolvimento do modelo	43
4.6.1.	Necessidades de arejamento	43
4.6.2.	Determinação do valor teórico de energia libertada na reacção.....	53
4.6.3.	Determinação das taxas de libertação de calor	54
4.6.4.	Determinação da taxa de produção de CO ₂	56
5.	Apresentação e Discussão de Resultados	59
5.1.	Caracterização das Lamas.....	59
5.2.	Caracterização dos substratos.....	60
5.3.	Necessidades de arejamento	63
5.3.1.	Ar requerido para satisfazer a necessidade estequiométrica de ar.....	63
5.3.2.	Ar necessário para reduzir a humidade.....	66
5.3.3.	Ar necessário para o controlo da temperatura	67
5.3.4.	Taxas de arejamento	68
5.3.5.	Humidade e Calor	73
5.3.6.	Degradabilidade e Testes respirométricos.....	79
5.3.7.	Picos de arejamento.....	85
5.3.8.	Caracterização genérica do processo	90
6.	Considerações Finais e Trabalhos Futuros	95
7.	Referências bibliográficas.....	101
	ANEXOS.....	109
	Anexo I – Imagens dos equipamentos laboratoriais	109
	Anexo II – PCS.....	113
	Anexo III – Análise Elementar.....	115
	Anexo IV – Humidade	121
	Anexo V – Sólidos Voláteis	123
	Anexo VI – pH	127
	Anexo VII – Condutividade	129
	Anexo VIII – Ar	131
	Anexo IX – Taxas de arejamento	133

Anexo X – Calor libertado (Q_i), energia libertada (E_i) e calor utilizado na evaporação da água ($C_{\text{evp,água}}$)	135
Anexo XI – Peso da Pilha	137
Anexo XII – CO_2 Acumulado	139
Anexo XIII – Razão C/N	141

Índice de Figuras

Figura 4.1 – Posto de controlo da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração	35
Figura 4.2 – Área de Compostagem 1 (Sul) da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração	35
Figura 4.3 – Área de Compostagem 2 (Norte) da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração	35
Figura 4.4 – Ventilador 2 da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração	35
Figura 4.5 – Válvula do Ventilador 2 da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração	36
Figura 5.1 – ar_e acumulado, nas Pilhas 1, 2 e 3.	65
Figura 5.2 – ar_h acumulado, nas Pilhas 1, 2 e 3.	66
Figura 5.3 – ar_t acumulado, nas Pilhas 1, 2 e 3.	67
Figura 5.4 – Taxas de arejamento médias, para a Pilha 1.	69
Figura 5.5 – Taxas de arejamento médias, para a Pilha 2.	70
Figura 5.6 – Taxas de arejamento médias, para a Pilha 3.	71
Figura 5.7 – Humidade ao longo do tempo de compostagem, nas Pilhas 1, 2 e 3.	73
Figura 5.8 – E_l e Q_l Acumulado na Pilha 1.	74
Figura 5.9 – E_l e Q_l Acumulado na Pilha 2.	75
Figura 5.10 – E_l e Q_l Acumulado na Pilha 3.	75
Figura 5.11 – Q_l e $C_{evp,água}$ Acumulado na Pilha 1.	77
Figura 5.12 – Q_l e $C_{evp,água}$ Acumulado na Pilha 2.	77
Figura 5.13 – Q_l e $C_{evp,água}$ Acumulado na Pilha 3.	78
Figura 5.14 – Sólidos voláteis biodegradáveis acumulados, na Pilha 1.	79
Figura 5.15 – Sólidos voláteis biodegradáveis acumulados, na Pilha 2.	80
Figura 5.16 – Sólidos voláteis biodegradáveis acumulados, na Pilha 3.	80
Figura 5.17 – CO_2 Acumulado no Reactor, Pilha 1.	82
Figura 5.18 – Produção de CO_2 Acumulado no Reactor na Pilha 2.	84
Figura 5.19 – Produção de CO_2 Acumulado no Reactor na Pilha 3.	84
Figura 5.20 – pH, nas Pilhas 1, 2 e 3.	91
Figura 5.21 – Condutividade, nas Pilhas 2 e 3.	91
Figura 5.22 – Sólidos Voláteis, nas Pilhas 1, 2 e 3.	92
Figura 5.23 – Razão C/N, nas Pilhas 1, 2 e 3.	93
ANEXOS	109
Anexo I – Imagens dos equipamentos laboratoriais	109
Figura A.I.1 – Placa de aquecimento VELP-Scientifica-ARE e Startorius PB-11.	109

Figura A.I.2 – Eléctrodo Orion 4 STAR	109
Figura A.I.3 – Estufa CASSEL	109
Figura A.I.4 – Carbolite	109
Figura A.I.5 – Balança OHAUS Scout-Pro	110
Figura A.I.6 – Bomba calorimétrica ISCO Calorimat e Auto charger - Parr	110
Figura A.I.7 – Balança STARTORIUS Micro.....	110
Figura A.I.8 – Analisador Elementar CNHS - O e Registador integrador, DP200 da Carlo Erba Instruments	110
Figura A.I.9 – Moinho Ultracentrífugo, do modelo LM1, da Retsch.....	111

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Cronograma das fases de trabalho.	6
Quadro 4.1 – Delineamento experimental.	34
Quadro 4.2 – Revolvimentos e das recolhas de amostras da Pilhas 1.	38
Quadro 4.3 – Revolvimentos e das recolhas de amostras das Pilhas 2 e 3.	38
Quadro 4.4 – Arejamento da Pilha1.	39
Quadro 4.5 – Arejamento das Pilhas 2 e 3.	39
Quadro 4.6 – Métodos de análise.	40
Quadro 5.7 – Equações estequiométricas das reacções ao longo do processo de compostagem para o Substrato 1.	63
Quadro 5.8 – Equações estequiométricas das reacções ao longo do processo de compostagem para o Substrato 2.	64
Quadro 5.9 – Equações estequiométricas das reacções ao longo do processo de compostagem para o Substrato 3.	64
Quadro 5.10 – Parâmetros cinéticos de SVB, nas Pilhas 1, 2 e 3.	81
Quadro 5.11 – Parâmetros cinéticos de CO ₂ , nas Pilhas 1, 2 e 3.	83
Quadro 5.12 – $ar_{e,méd}$, $ar_{h,méd}$, $ar_{t,méd}$, $Q_i,méd$, $C_{evp,água,méd}$, $v_{SVB,méd}$, $v_{CO_2,méd}$, $TA_{méd}E_{global}$, $TA_{méd}H_{global}$ e $TA_{méd}T_{global}$, nas Pilhas 1, 2 e 3.	86
Quadro 5.13 – ar_e , ar_h , ar_t , Q_i , $C_{evp,água}$, v_{SVB} , v_{CO_2} , $TA_{méd}E$, $TA_{méd}H$ e $TA_{méd}T$, na Pilha 1.	87
Quadro 5.14 – ar_e , ar_h , ar_t , Q_i , $C_{evp,água}$, v_{SVB} , v_{CO_2} , $TA_{méd}E$, $TA_{méd}H$ e $TA_{méd}T$, na Pilha 2.	88
Quadro 5.15 – ar_e , ar_h , ar_t , Q_i , $C_{evp,água}$, v_{SVB} , v_{CO_2} , $TA_{méd}E$, $TA_{méd}H$ e $TA_{méd}T$, na Pilha 3.	88
ANEXOS	109
Anexo II – PCS	113
Quadro A.II.1 – Poder Calorífico Superior, PCS, Pilha 1.	113
Quadro A.II.2 – Poder Calorífico Superior, PCS, Pilhas 2 e 3.	113
Quadro A.II.3 – Poder Calorífico Superior, PCS, Pilhas 2 e 3 (valores médios).	114
Anexo III – Análise Elementar	115
Quadro A.III.1 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 1.	115
Quadro A.III.2 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 1 (valores médios).	115
Quadro A.III.3 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 2.	116
Quadro A.III.4 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 2 (valores médios).	117
Quadro A.III.5 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 3.	118
Quadro A.III.6 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 3 (valores médios).	119
Anexo IV – Humidade	121
Quadro A.IV.1 – Humidade, Pilha 1.	121

Quadro A.IV.2 – Humidade, Pilha 1 (valores médios).....	121
Quadro A.IV.3 – Humidade, Pilhas 2 e 3.....	122
Quadro A.IV.4 – Humidade, Pilhas 2 e 3 (valores médios).....	122
Anexo V – Sólidos Voláteis	123
Quadro A.V.1 – Sólidos Voláteis, Pilha 1.	123
Quadro A.V.2 – Sólidos Voláteis, Pilha 1 (valores médios).....	123
Quadro A.V.3 – Sólidos Voláteis, Pilhas 2 e 3.....	124
Quadro A.V.4 – Sólidos Voláteis, Pilhas 2 e 3 (valores médios).	125
Anexo VI – pH	127
Quadro A.VI.1 – pH, Pilha 1.	127
Quadro A.VI.2 – pH, Pilhas 2 e 3.....	127
Quadro A.VI.3 – pH, Pilhas 2 e 3 (valores médios).	128
Anexo VII – Condutividade	129
Quadro A.VII.1 – Condutividade, Pilhas 2 e 3.....	129
Quadro A.VII.2 – Condutividade, Pilhas 2 e 3 (valores médios).	129
Anexo VIII – Ar	131
Quadro A.VIII.1 – ar_e , Pilha 1.	131
Quadro A.VIII.2 – ar_e , Pilhas 2 e 3.....	131
Quadro A.VIII.3 – ar_h , Pilha 1.	131
Quadro A.VIII.4 – ar_h , Pilhas 2 e 3.....	131
Quadro A.VIII.5 – ar_t , Pilha 1.....	132
Quadro A.VIII.6 – ar_t , Pilhas 2 e 3.	132
Anexo IX – Taxas de arejamento	133
Quadro A.IX.1 – $TA_{méd}E$, Pilha 1.	133
Quadro A.IX.2 – $TA_{méd}E$, Pilhas 2 e 3.....	133
Quadro A.IX.3 – $TA_{méd}H$, Pilha 1.....	133
Quadro A.IX.4 – $TA_{méd}H$, Pilhas 2 e 3.	134
Quadro A.IX.5 – $TA_{méd}T$, Pilha 1.	134
Quadro A.IX.6 – $TA_{méd}T$, Pilhas 2 e 3.....	134
Anexo X – Calor libertado (Q_l), energia libertada (E_l) e calor utilizado na evaporação da água ($C_{evp,água}$)	135
Quadro A.X.1 – Calor libertado (Q_l), Pilha 1.	135
Quadro A.X.2 – Calor libertado (Q_l), Pilhas 2 e 3.....	135
Quadro A.X.3 – Energia libertado (E_l), Pilha 1.	135
Quadro A.X.4 – Energia libertado (E_l), Pilhas 2 e 3.....	136

Quadro A.X.5 – Calor utilizado na evaporação da água ($C_{\text{evp,água}}$), Pilha 1.	136
Quadro A.X.6 – Calor utilizado na evaporação da água ($C_{\text{evp,água}}$), Pilhas 2 e 3.	136
Anexo XI – Peso da Pilha	137
Quadro A.XI.1 – Peso da Pilha 1.	137
Quadro A.XI.2 – Peso das Pilhas 2 e 3.	137
Anexo XII – CO ₂ Acumulado	139
Quadro A.XII.1 – CO ₂ acumulado, Pilha 1.	139
Quadro A.XII.2 – CO ₂ acumulado, Pilhas 2 e 3.	139
Anexo XIII – Razão C/N	141
Quadro A.XIII.1 – Razão C/N, Pilha 1.	141
Quadro A.XIII.2 – Razão C/N, Pilhas 2 e 3.	141

1. Introdução

1.1. Aspectos Gerais

Actualmente a produção de gado em grande escala e o risco de transmissão de doenças através da cadeia alimentar que a globalização acarreta, evidenciam a necessidade de preocupação acrescida no que respeita a biossegurança (Albihn e Vinneras, 2007).

Por um lado o estrume de gado representa um recurso valioso e disponível, que utilizado de maneira apropriada tem o potencial de vir a substituir fertilizantes minerais, pela sua valiosa composição em nutrientes para as plantas. No entanto, este potencial corrector orgânico utilizado directamente no solo, sem tratamento prévio, pode causar novos problemas devido à presença de metais pesado, microrganismos patogénicos, maus odores e compostos fitotóxicos (Vu *et al.*, 2007; Hernández *et al.*, 2006).

O uso directo deste tipo de resíduo pode também constituir um problema ambiental devido à libertação de gases, sendo uma fonte de poluição do ar, com o risco de se tornar uma ameaça de contaminação de aquíferos e águas superficiais (Vu *et al.*, 2007; Hernández *et al.*, 2006).

Enquadrado nas novas estratégias de gestão de resíduos, o Decreto-lei n.º 118/2006, de 21 de Junho de 2006 estabelece o regime a que obedece a utilização de lamas de depuração, que incluem as lamas provenientes de actividades agro-pecuárias, que transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 86/278/CE de 12 de Junho de 1986, relativa à protecção do ambiente e em especial dos solos, na utilização agrícola de lamas de depuração. O mesmo Decreto-lei tem como objectivo evitar os efeitos nocivos para o

1. Introdução

homem, para a água, para os solos, para a vegetação e para os animais e promover a correcta utilização das lamas de depuração.

O *Working Document – Biological treatment of biowaste – 2nd Draft* (Comissão Europeia, 2001) sugere ainda que apenas os resíduos biológicos tratados devem ser utilizados nos solos, à excepção dos resíduos não tratados mencionados no Anexo I do mesmo documento. O processo de compostagem é referido como uma biotecnologia útil no tratamento de resíduos biológicos.

Assim a minimização dos riscos na utilização de lamas provenientes de suiniculturas pode passar pela estabilização da matéria orgânica através do processo de compostagem (Hernández *et al.*, 2006).

Os principais factores que caracterizam e afectam o processo e que podem influenciar o grau de estabilização do composto final são a humidade, a temperatura, a porosidade e volume de espaços vazios, o pH, a relação C/N e o arejamento (Choi, 2007; Travassos, 2006; Buckley, 2001; Haug, 1993).

A compostagem pode garantir não só a estabilização da matéria orgânica que compõe estes resíduos e a sua higienização, mas também possibilita o seu armazenamento e transporte mais seguro.

No entanto o desenvolvimento do processo de compostagem irá depender do melhor controlo do processo. Assim é necessário assegurar não só a qualidade do produto final mas também minimizar o seu impacte ambiental.

O controlo do processo de compostagem passa especialmente pela regulação do arejamento e das necessidades de oxigénio, o que está directamente relacionado com a degradabilidade da matéria orgânica e a cinética de degradação.

Na determinação da estabilidade do composto, um método aceite como bastante satisfatório é a utilização de testes respirométricos.

Uma vez que o arejamento das pilhas irá afectar todos os outros parâmetros que caracterizam o processo é necessário determinar as necessidades de arejamento, quando se efectua o dimensionamento de arejadores de uma instalação de compostagem, tendo sempre em conta as características do substrato.

1.2. Objectivos

O presente trabalho teve como principal objectivo determinar as necessidades de arejamento na compostagem de lamas digeridas de suiniculturas.

Determinar as taxas de arejamento para satisfazer as três estratégias adoptadas, ou seja, para satisfazer a necessidade estequiométrica, para remoção da humidade e controlo da temperatura, através do método proposto por Haug (1993).

Como objectivos secundários o presente trabalho pretendeu verificar as necessidades de arejamento obtidas através da determinação de PCS e estudar o efeito da adição de casca de arroz no substrato através da determinação de SV e da análise de ensaios respirométricos com base na produção de CO₂.

2. Plano de Trabalho

Para atingir os objectivos pretendidos, o trabalho foi desenvolvido em 6 Fases:

- *Fase I – Revisão bibliográfica*

A primeira fase consistiu na pesquisa de dissertações, trabalhos, artigos científicos e documentos legais sobre a compostagem de lamas e em particular sobre a compostagem de lamas de suinicultura, para desenvolvimento do tema e para ser definida a metodologia de trabalho.

- *Fase II – Definição da metodologia de trabalho*

A segunda fase foi concretizada com o apoio da bibliografia revista, como é referido anteriormente. A metodologia foi adaptada consoante os objectivos pretendidos.

- *Fase III – Trabalho de campo e recolha de amostras*

O trabalho de campo e a recolha de amostras iniciou-se a partir do momento que ficou definida a metodologia de trabalho.

- *Fase IV e Fase V – Análises de laboratório e Tratamento e análise de resultados*

As fases de análises de laboratório e tratamento e análise de resultados, foram desenvolvidas simultaneamente e iniciaram-se no começo do trabalho de campo e recolha de amostras.

- *Fase VI – Redacção da dissertação*

A redacção da dissertação começou a desenvolver-se após o início do tratamento e análise de resultados.

O trabalho desenvolveu-se entre os meses de Março de 2008 e Março de 2009. O trabalho experimental, que incluiu trabalho de campo e laboratório decorreu entre os meses de Julho e Janeiro de 2009. No Quadro 2.1, é apresentado o cronograma das fases de trabalho.

2. Plano de Trabalho

Quadro 2.1 – Cronograma das fases de trabalho.

Fases	Cronologia												
	2008										2009		
	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.
I. Pesquisa bibliográfica	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
II. Definição da metodologia de trabalho		✓	✓	✓									
III. Trabalho de campo e recolha de amostras					✓	✓	✓	✓					
IV. Análises de laboratório					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
V. Tratamento e análise de resultados					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
VI. Redacção da dissertação								✓	✓	✓	✓	✓	✓

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Processo de Compostagem

O processo de compostagem é definido por Haug (1993) como a decomposição e estabilização de substratos orgânicos, que sujeitos a certas condições, resultam num produto final estável, livre de agentes patogénicos e sementes e ainda com as condições necessárias para poder ser benéficamente aplicado no solo. As condições necessárias para que se atinja este produto final têm que permitir o desenvolvimento de temperaturas termófilas que resultem na produção de calor produzido biologicamente.

As diversas transformações sofridas por estes substratos orgânicos são realizadas por acções sucessivas de diferentes microrganismos e a taxa e extensão dessas mesmas transformações depende não só do material inicial mas também das condições promovidas durante a compostagem (Hernández *et al.*, 2006).

Se a compostagem correr correctamente, podem distinguir-se três fases. A primeira fase é a chamada fase mesófila e consiste no crescimento e multiplicação intensa dos microrganismos que irá resultar no aumento da temperatura até à gama termófila. A segunda fase, designada por termófila é caracterizada pelas elevadas taxas de consumo de oxigénio, e de redução de matéria orgânica e onde a temperatura pode atingir 50 a 70 °C. A terceira fase, ou fase de maturação caracteriza-se pela diminuição da temperatura e das taxas de consumo de oxigénio. A diminuição da temperatura no final do processo, acontece devido ao decrescimento da população microbiana depois de se atingirem as temperaturas termófilas (Haug, 1993).

Segundo Choi (2007) a compostagem aeróbia é um método eficiente para a estabilização das lamas de suinicultura. Da compostagem destas lamas resulta um produto estabilizado que pode ser utilizado como fertilizante e corrector de solo e para o controlo da erosão.

3.2. Sistema de compostagem

As operações do processo de compostagem podem realizar-se em sistemas reactor ou não reactor.

Quando a compostagem é realizada dentro de reactores é mais fácil o controlo dos factores que caracterizam o processo, que já foram referidos anteriormente, isto é, a humidade, a temperatura, o arejamento, a porosidade, o pH e a relação C/N. Neste tipo de sistemas também é possível obter-se velocidades de decomposição superiores, tempos de retenção mais baixos e controlo de odores mais eficiente. No entanto, este tipo de sistemas acarreta custos muito elevados de investimento, manutenção e requer mão-de-obra especializada. Além disso, este tipo de sistemas limita a possibilidade de aumentar a escala do processo no futuro (Choi, 2007; Fernandes, 1999).

Os sistemas que a compostagem não é realizada dentro de um reactor podem ser classificados em sistemas “*Windrow*” (arejamento por revolvimento e por arejamento forçado) ou sistema de pilhas estáticas arejadas (Choi, 2007; Fernandes, 1999; Haug, 1993).

O sistema “*Windrow*” é definido como um processo em que o substrato é colocado em pilhas de secção triangular (1,5 a 1,8 m de altura), e comprimento variável sendo a oxigenação da massa garantida por revolvimentos periódicos e através do arejamento forçado (Tchobanoglous e Kreith, 2002; Fernandes, 1999). Pouco do oxigénio é introduzido na massa de resíduos através do efeito de ventilação natural (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Este é o tipo de sistema de compostagem mais comum uma vez que é o que apresenta melhor custo/benefício. No entanto este tipo de sistema também é o que necessita de mais espaço (Choi, 2007).

Nos sistemas de pilhas estáticas arejadas o material a compostar é colocado sobre tubos perfurados ligados a arejadores, em que as pilhas são colocadas de forma similar à utilizada nos sistemas “*Windrow*” (Fernandes, 1999; Haug, 1993; Tchobanoglous, 1993).

3.3. Parâmetros de Controlo do Processo

Existe uma série de factores que influenciam e caracterizam o processo de compostagem e por isso são utilizados como parâmetros de controlo. Estes parâmetros são aqueles que vão influenciar directa ou indirectamente o metabolismo dos microrganismos que são responsáveis pela degradação da matéria orgânica (Marques, 2008).

Como foi referido anteriormente, os factores que caracterizam e afectam o processo de compostagem incluem a humidade, a temperatura, a porosidade e volume de espaços vazios, o pH, a relação C/N e o arejamento (Choi, 2007; Travassos, 2006; Buckley, 2001; Silveira, 1987).

3.3.1. Humidade

A perda de água resultante da evaporação durante o desenvolvimento do processo é muito importante em compostagem. A humidade inicial considerada óptima por autores como Venglosky *et al.*, 2005 e Buckley, 2001, encontra-se entre os 55-65%. No entanto, existem grandes diferenças de humidade óptima entre materiais que dependem da estrutura física e do tamanho das suas partículas (Gea e Richard, 2008; Venglosky *et al.*, 2005).

3. Revisão Bibliográfica

Ainda segundo Buckley (2001), quando o teor em humidade excede os 60%, a porosidade é perdida e as condições do processo tornam-se anaeróbias.

Por outro lado se a percentagem decresce abaixo dos 50%, a taxa de decomposição diminui porque os nutrientes têm que estar solubilizados para poderem ser utilizados pelos microrganismos (Venglosky *et al.*, 2005; Buckley, 2001).

Assim, a percentagem de humidade deve ser suficiente para fornecer um ambiente favorável para o crescimento microbiano. Uma vez que as lamas de suinicultura têm percentagens de humidade elevadas, pode ser necessária a adição de estruturantes para diminuir a percentagem de humidade e conferir estrutura ao substrato húmido. A adição de estruturante irá também melhorar a porosidade da mistura, facilitar a passagem de ar e estimular a actividade aeróbia (Choi, 2007).

Haug (1993) refere que existem outros dois métodos relevantes para diminuir ou corrigir o excesso de água no substrato inicial. Pode ser reciclado composto pronto para condicionar o substrato ou então podem ser utilizados correctores secos, como pó de madeira e resíduos verdes.

Por outro lado, a matriz do composto é uma rede de partículas sólidas que contém espaços vazios de tamanhos variáveis. Os vazios entre partículas são ocupados por água e ar. Assim, se o substrato apresentar uma percentagem de humidade elevada dificulta o processo de compostagem porque pode causar o empacotamento do material e reduzir os vazios, o que impede o movimento do ar necessário através do material (Gea e Richard, 2008).

Se os espaços vazios forem ocupados totalmente por água, a transferência de oxigénio é bastante restringida e a compostagem aeróbia torna-se incomportável, na ausência de

agitação constante. Se alguma água for removida e os vazios ocupados por ar, começa a existir transferência de oxigénio e a compostagem aeróbia é possível. No entanto, se for removida água a mais a cinética microbiana será desacelerada pela falta de humidade (Gea e Richard, 2008).

Segundo Tchobanoglous e Kreith (2002) quando a humidade é reduzida e a disponibilidade de oxigénio deixa de ser limitante, a água disponível para a população microbiana torna-se limitante.

Atingir o balanço entre humidade e espaços livres nas misturas iniciais não garante que o balanço adequado se mantenha até ao fim do processo. Se a taxa de arejamento for adequada, as temperaturas termófilas irão causar uma remoção importante de humidade que pode tornar-se limitante (Haug, 1993).

Assim, a solução para controlar este parâmetro poderá também passar pelo arejamento adequado e controlado que por um lado permita o desenvolvimento de temperaturas termófilas durante a compostagem mas que não chegue a causar uma remoção excessiva de humidade, tornando a humidade um factor limitante do processo (Tchobanoglous e Kreith, 2002; Haug, 1993).

3.3.2. Temperatura

A temperatura é um parâmetro crítico no processo de compostagem uma vez que influencia não só as reacções metabólicas como a estrutura da população microbiana (Marques, 2008).

Como foi referido anteriormente, as fases do processo de compostagem são determinadas pela temperatura: fase mesófila, termófila e de maturação (ou arrefecimento).

Para se conseguir um produto com um adequado grau de higienização é necessário que durante a compostagem se atinjam temperaturas termófilas, uma vez que a higienização apenas é conseguida se forem atingidas temperaturas superiores a 50°C, durante um período de semanas, durante as quais são destruídos os agentes patogénicos (Albiñ e Vinneras, 2007; Venglosky *et al.*, 2005).

A temperatura tem, também um papel fundamental nas taxas de reacções bioquímicas, uma vez que estas aumentam exponencialmente com a temperatura. No entanto, as temperaturas podem aumentar até ao ponto de inactivação da população de microrganismos, antes que se obtenha a estabilização e degradação pretendida. Os valores óptimos durante a compostagem, são motivo de controvérsia entre os investigadores, mas Haug (1993) considera que os valores óptimos para o processo podem variar entre 40 a 70°C. Para controlar a temperatura do processo, de modo a situar-se a valores mais favoráveis para a população de microrganismos, o fornecimento do ar é relevante para remover o calor em excesso (Marques, 2008; Haug, 1993).

Por outro lado, o calor perdido durante a compostagem será libertado primariamente através dos gases de saída do processo. A libertação de calor resultante das transformações e decomposição da matéria orgânica irá ter como consequência o aquecimento do meio mas também a formação de vapor de água, originando a perda de humidade e o arrefecimento dos resíduos em compostagem (Haug, 1993).

3.3.3. Porosidade e volume de espaços vazios

A porosidade define-se como a relação entre o volume de espaços vazios e o volume total do substrato orgânico (Travassos, 2006). A compostagem, por se tratar de um processo aeróbio é influenciada pela difusão de ar conseguida no substrato.

Como foi referido anteriormente o valor de humidade óptima é um compromisso entre as necessidades de água para os microrganismos e a sua necessidade simultânea de fornecimento adequado de oxigénio. O volume de espaços vazios é influenciado de certa forma pelo modo de arejamento. Se por um lado, com o revolvimento constante, são aceitáveis volumes de espaços vazios mais baixos, uma vez que o resíduo é repetidamente exposto a novas superfícies de oxigénio. Por outro, o volume de espaços vazios recomendável é aproximadamente 30% (Druilhe *et al.*, 2008).

3.3.4. pH

O pH é um dos principais factores que influênciam o processo de higienização no decorrer da compostagem (Albihn e Vinneras, 2007). Em compostagem de resíduos resultantes da indústria pecuária, como as lamas de suinicultura, se o pH for próximo de 8 é possível conseguir-se uma boa higienização durante o processo mesófilo (Albihn e Vinneras, 2007; Gil *et al.*, 2007).

Segundo Choi (2007), o pH neutro é preferível, no entanto aceitam-se valores dentro do intervalo 5,5 a 8,5. Tchobanoglous (1993), também é da mesma opinião considerando que o pH ideal para o crescimento dos microrganismos se encontra em limites mais estreitos dentro da gama do pH neutro, entre 6,5 e 7,5.

Haug (1993) considera que o pH é um parâmetro selectivo devido à sua influência na flora microbiana, existente na massa em compostagem, uma vez que está directamente relacionado com o metabolismo dos microrganismos. Se valores de pH inferiores a 3 não permitem a sobrevivência da maioria das bactérias, valores superiores a 11,5 podem provocar alterações no estado de ionização de vários compostos proteicos o que irá conduzir à inactivação enzimática.

3.3.5. Relação C/N

A relação C/N é um aspecto muito importante do processo de compostagem, uma vez que reflecte disponibilidade biológica de carbono e azoto (Venglosky *et al.*, 2005). Esta disponibilidade vai afectar a síntese celular que é influenciada pela concentração de azoto e porque o carbono é o principal constituinte das moléculas orgânicas nas células (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Dependendo do tipo de material que constitui o substrato inicial, são consideradas diferentes as proporções de carbono e azoto.

Venglosky *et al.* (2005), considera que os valores óptimos de C/N para o processo de compostagem se encontram entre 25 e 35. Se esta razão exceder os 35 o processo abranda e razões inferiores a 20 vão resultar em perdas de azoto que ocorrem através das emissões de amoníaco. Segundo este mesmo autor os valores finais de razão C/N estão normalmente entre 10 e 15.

Segundo Tchobanoglous (1993) os valores ideais de C/N para a maioria dos resíduos orgânicos encontram-se entre 20 e 25. Refere ainda que os valores típicos iniciais variam consoante o tipo de material, por exemplo as lamas de ETAR apresentam normalmente valores bastante baixos, enquanto os resíduos verdes apresentam valores bastante elevados e acrescenta que o valor de C/N comum para estrumes de suínos é cerca de 20 e para lamas de ETAR digeridas cerca de 15,7.

Outros autores como Choi (2007) e Haug (1993) consideram que a razão óptima para o processo se encontra num intervalo maior, entre 25 e 40.

3.3.6. Arejamento

O arejamento durante o processo de compostagem é de grande importância e tem como principais objectivos controlar a temperatura, diminuir a humidade, evitar a compactação do substrato e consequentemente fazer uma eficiente distribuição do ar (Gómes-Brandóm *et al.*, 2008; Albiñ e Vinneras, 2007; Gil *et al.*, 2007).

A prioridade no fornecimento adequado de oxigénio, deve-se principalmente à necessidade de manter a pilha em as condições aeróbias, evitando que os microrganismos anaeróbios abundem no meio. A possibilidade de predominância dos microrganismos anaeróbios é também relevante por estes serem os responsáveis pela produção de odores desagradáveis durante o processo de compostagem (Druilhe *et al.*, 2008; Choi, 2007).

No entanto o arejamento tem igual relevância no controlo da temperatura.

De um modo geral as taxas de reacções bioquímicas aumentam exponencialmente com a temperatura, mas se as temperaturas atingirem valores entre 75 e 85 °C, as taxas de reacções diminuem devido à inactivação da população microbiana. Assim o processo pode ser melhorado, se for reduzida a temperatura, através da remoção do calor que é gerado pela actividade biológica. O fornecimento de ar é nesse caso necessário e bastante eficiente para a remoção do calor que se encontra em excesso (Haug, 1993).

O fornecimento de ar insuficiente pode ter efeitos negativos no processo, o fornecimento de ar em excesso pode dificultar a obtenção das temperaturas termófilas durante a compostagem e reduzir a humidade a percentagens limitantes (Choi, 2007).

Uma maneira prática de monitorizar o adequado fornecimento de ar é através dos odores produzidos pela pilha. A emanação de odores putrefactos e a monitorização de O₂ e CO₂ são

3. Revisão Bibliográfica

indicadores positivos de actividade anaeróbia. A emissão de odores putrefactos, apesar de ser uma técnica empírica, é de certo bastante útil na monitorização do processo. A presença destes odores pode ser resolvida através do correcto arejamento das pilhas em compostagem. No entanto, mesmo sendo o arejamento suficiente podem-se criar zonas anaeróbias na pilha e neste caso o revolvimento periódico é um método viável para ultrapassar o problema (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Ainda, segundo Tchobanoglous e Kreith (2002), as tentativas para estabelecer um modelo que determine uma taxa de arejamento universal para ser utilizada como parâmetro de projecto, têm sido em vão, uma vez que existe uma série de factores que influenciam a necessidade de ar. Entre eles estão a temperatura, humidade, tipo de população microbiana e disponibilidade de nutrientes. Segundo estes autores determinar a quantidade de oxigénio necessário ao processo unicamente através da sua relação com a oxidação de carbono não é totalmente aceitável, uma vez que nem todo o carbono está totalmente disponível para ser degradado pelos microrganismos.

Por todas as razões apresentadas o arejamento é o parâmetro de controlo mais importante nos sistemas de compostagem. O arejamento fornece aos microrganismos o oxigénio necessário para o seu metabolismo, reduz a humidade, controla a temperatura e remove o CO₂ e outros gases prejudiciais e controla a distribuição espacial tanto das taxas de degradação, como da temperatura e da humidade (Das e Keener, 1997)

Assim, ao ser elaborado um projecto numa instalação de compostagem é necessário definir a quantidade de ar a fornecer ao sistema, para responder a três necessidades principais, que são a necessidade de ar para a decomposição orgânica, para a diminuição da humidade e

para o controlo da temperatura, tendo sempre em atenção as características do substrato e o sistema de compostagem utilizado.

3.4. Necessidades de arejamento

Como foi referido anteriormente, ao definir-se a quantidade de ar a aplicar a um substrato em compostagem deve satisfazer-se a necessidade de oxigénio durante a decomposição orgânica (necessidade estequiométrica), necessidade de diminuição da humidade do substrato, quando necessário, como no caso da compostagem de lamas com percentagens de humidade elevadas (necessidade para redução da humidade) e por fim para controlo da temperatura (necessidade para controlo da temperatura) (Haug, 1993).

3.4.1. Necessidade estequiométrica de ar

Segundo Haug (1993) uma abordagem para determinar a necessidade estequiométrica de ar para a degradação da matéria orgânica é feita através da determinação da composição química dos sólidos orgânicos e da extensão de degradação durante a compostagem. Ou seja, pode ser baseada na composição do substrato inicial e na composição do composto final.

Recorrendo à equação geral de compostagem, que considera a degradabilidade do substrato inicial, é possível determinar a quantidade de oxigénio necessária ao processo (Rich, referido por Haug, 1993 e por Tchobanoglous *et al.*, 1993). No Capítulo 4 (Metodologia – Equação 4.7) é apresentada a equação geral da compostagem, utilizada no presente estudo.

3.4.2. Necessidade de ar para redução da humidade

Como foi referido anteriormente, a humidade deve ser suficiente para fornecer um ambiente favorável ao crescimento microbiano, no entanto vários autores são da opinião que o excesso de humidade pode ser um factor limitante no decorrer do processo de

compostagem. A principal limitação deste parâmetro é a perda de porosidade no substrato (Druilhe *et al.*, 2008; Choi, 2007; Venglosky *et al.*, 2005; Buckley, 2001).

Uma vez que a compostagem é um processo aeróbio, é importante que a estrutura do substrato permita a difusão de ar através do mesmo (Choi, 2007).

A adição de estruturantes pode diminuir a percentagem de humidade, mas tem como principal propósito conferir estrutura ao substrato húmido. Assim, é provável que a adição do estruturante tenha, um papel fundamental na redução da humidade, em substratos húmidos. No entanto, mesmo que esse efeito não se observe, vai ter com certeza consequências no arranque do processo, e no desenvolvimento de temperaturas mais elevadas, que sem essa adição seriam mais difíceis de atingir.

Mesmo que a humidade não seja um factor limitante para o processo, não deixa de ser importante a determinação da necessidade de redução da humidade, no dimensionamento de um arejador (Haug, 1993).

A necessidade estequiométrica de oxigénio é muitas vezes inferior aquela necessária para a secagem do substrato assim o controlo do fornecimento do ar torna-se um factor importante na operação do processo de compostagem e a extensão da secagem pode ser regulada através desse mesmo controlo.

3.4.3. Necessidade de ar para o controlo da temperatura

As taxas de reacção bioquímica aumentam exponencialmente com a temperatura. No entanto, as temperaturas podem aumentar até ao ponto onde os microrganismos são inactivados. Isto acontece quando as temperaturas atingem valores limitantes (Marques, 2008; Das e Keener, 1997). Assim é de esperar que o controlo da temperatura passe pela

introdução de ar na pilha, removendo o calor que se encontra em excesso e consequentemente se consiga atingir valores favoráveis à população microbiana.

Foi considerado no âmbito do presente trabalho, o valor de temperatura ambiente de 20°C e que o composto se manteve à temperatura média de 55°C, uma vez que este é um valor médio dentro dos limites de temperatura considerados ótimos para o processo (Haug, 1993).

A libertação de calor durante o processo de compostagem será efectuada principalmente através dos gases que deixam o sistema, mas algum do calor será libertado para o exterior mais próximo. No entanto, esta última perda é relativamente pequena comparada com a perda nos gases que são libertados, não sendo considerada a sua determinação (Haug, 1993).

O calor libertado através da decomposição orgânica aquece o ar que entra na pilha, aquece o vapor de água até à temperatura dos gases de saída e fornece calor de vaporização. Se apenas forem consideradas estas maiores necessidades para a redução da temperatura e não forem tidas em conta as perdas menores é possível obter uma solução aproximada do problema, e determinar a necessidade de ar para a remoção de temperatura (Haug, 1993).

Nos substratos húmidos a necessidade de remoção de humidade pode ser a necessidade preponderante. Nesse caso o calor de vaporização é certamente o maior termo do balanço de massa, no entanto a remoção de humidade e a remoção de calor estão relacionados e a exigência de ar para ambas não deve diferir muito em substratos húmidos (Haug, 1993).

Mesmo para valores elevados de humidade, a adição de estruturante poderá influenciar os valores de necessidade de ar.

Por outro lado nos substratos secos a necessidade de arejamento para a remoção de calor deverá ser superior à necessidade para remoção de humidade. As necessidades para a humidade e calor serão superiores à exigência estequiométrica e são normalmente as condições preponderantes (Haug, 1993).

3.4.4. Taxas de arejamento e picos de arejamento

As necessidades de arejamento anteriormente referidas, tanto a estequiométrica, como a de remoção de humidade e de controlo da temperatura, representam as quantidades que têm de ser fornecidas ao ciclo de compostagem. Converter estas quantidades em taxas de arejamento requer conhecimento do tipo de sistema de compostagem e a cinética de oxidação microbiana (Haug, 1993).

Segundo Haug, 1993 num sistema de pilha arejada, a quantidade de ar total pode ser convertida numa taxa de arejamento considerando o tempo de duração do processo.

Um grande número de factores pode provocar os picos de arejamento. Por um lado, a taxa de oxidação orgânica, e assim a taxa de libertação de calor, varia ao longo do processo de compostagem. Por outro lado, o tipo de controlo de arejamento pode aumentar o factor de pico. A lógica de controlo de arejamento on/off é utilizado em alguns sistemas, para fazer face a esta variação. A utilização de sensores de temperatura é comum em muitos sistemas de compostagem e também pode resultar em factores de picos elevados (Haug, 1993).

Diversos investigadores, observaram que a taxa respirométrica de consumo de oxigénio ou de produção de dióxido de carbono é função da temperatura. Assim os picos de arejamento iram corresponder aos intervalos de picos de consumo de oxigénio ou de produção de dióxido de carbono (Adani *et al.*, 2003).

Os picos de arejamento podem manter-se apenas por um pequeno período de tempo até que a necessidade de pico tenha passado, assim pode considerar-se que existe um tempo de duração associado à necessidade de picos de arejamento. O que pode significar picos instantâneos de 1h ou de 24h (Haug, 1993).

Em sistemas em que não se consegue satisfazer a necessidade de pico, as temperaturas do processo iram exceder o valor desejado. Assim é importante ter-se em conta os prós e contras em relação à capacidade de arejamento do sistema versus o custo de capital e as necessidades de controlo de temperatura do processo, assim como as necessidades para secagem e para a estequiometria. Financeiramente, pode compensar reduzir o tempo de pico e deixar a temperatura aumentar durante um pequeno período de tempo (Haug, 1993).

3.5. Cinética do processo

Os sistemas substrato/microrganismos são classificados em homogéneos ou heterogéneos (Haug, 1993).

Nos sistemas homogéneos, os microrganismos encontram-se dispersos numa solução aquosa que contém um substrato solúvel. A massa de microrganismos é completamente dispersa no volume do reactor (Haug, 1993).

Nos sistemas heterogéneos o substrato é insolúvel e apresenta-se numa forma sólida e particulada. Este tipo de sistema pode ainda ser classificado em duas subcategorias. O substrato sólido pode estar suspenso numa fase fluida estruturante ou a fase aquosa pode estar limitada a uma ligação de água associada ao substrato sólido (Haug, 1993).

A maioria dos substratos na compostagem consiste em matéria orgânica sólida com a humidade limitada à ligação com o substrato. Assim, a compostagem pode ser descrita como

um sistema heterogéneo com substrato sólido e humidade limitante. A cinética desenvolvida para os sistemas substrato/microrganismos pode aplicar-se ao processo de compostagem (Haug, 1993).

A fase activa da compostagem é o período no qual o substrato está disponível para a decomposição microbiana. Durante esta fase a cinética pode ser descrita como uma reacção de primeira ordem (Keener *et al.*, 1993).

As reacções de cinética de primeira ordem podem basear-se no transporte de O_2 (Finger, referido por Mason, 2006; Haug, 1993) ou na degradação dos sólidos voláteis (Das e Keener, 1997; Haug, 1993).

Taxas de decomposições diferentes podem ser interpretadas com base nos valores de k (coeficiente de velocidade de degradação). Assim, substratos como fibras de madeira naturais, que são resistentes aos ataques enzimáticos, apresentam valores de k baixos relativamente a um substrato mais facilmente sujeito à solubilização pelas enzimas hidrolíticas (Haug, 1993).

A compostagem da maioria de substratos é caracterizada por um período inicial de elevado consumo de oxigénio seguido de um período mais extenso com menor consumo. Substratos complexos, como resíduos de lamas, são compostos de misturas orgânicas com valores de k variáveis. Durante a fase inicial, o substrato apresenta valores elevados de k , porque a decomposição é mais rápida e as populações de microrganismos aumentam. Eventualmente as concentrações destes substratos com “taxas elevadas” são esgotadas. No entanto, os substratos com baixos valores de k continuam a decompor-se a taxas inferiores durante um longo período de tempo (Haug, 1993).

Os valores de k apresentados por diversos autores referidos por Mason (2006), encontram-se entre $0,025$ e $0,190d^{-1}$, dependendo do tipo de substrato e intervalos de temperatura. Por outro lado, Keener *et al.* (1993) apresentaram valores de k entre $0,025$ e $0,290d^{-1}$, para diversos substratos e para valores de temperatura entre 50 e $60^{\circ}C$.

A taxa de decomposição nos sistemas biológicos é considerada uma função da temperatura (Keener *et al.*, 1993).

Dentro de certos limites as taxas das reacções bioquímicas duplicam para cada aumento de temperatura de $10^{\circ}C$. No entanto, temperaturas superiores a $85^{\circ}C$ podem limitar o processo cinético (Finstein e Hogan, 1993; Haug, 1993).

A temperatura na qual se verifica a maior taxa de decomposição durante a fase activa da compostagem encontra-se entre 35 e $60^{\circ}C$. O número de espécies diminui quando as temperaturas excedem os $57^{\circ}C$ (Finstein, referido por Keener *et al.*, 1993). Acima de $60^{\circ}C$, a actividade da celulase também diminui. Assim, a temperaturas superiores a $60^{\circ}C$ as taxas de decomposição diminuem (Keener *et al.*, 1993).

Mesmo quando o oxigénio não é limitante e o substrato se encontra solubilizado e disponível, existe um grande número de factores que podem limitar a cinética dos microrganismos. As taxas de reacção dos microrganismos podem ser limitadas pelo baixo teor em compostos orgânicos degradáveis, temperaturas baixas ou elevadas, baixa humidade, falta de espaço livres com ar, baixas percentagens de oxigénio, baixas concentrações de nutrientes, pequenas populações de microrganismos e presença de substâncias tóxicas (Haug, 1993).

3.6. Balanço energético

No processo de compostagem a maior quantidade de energia, introduzida no sistema é fornecida pelas moléculas orgânicas dos substratos. À medida que as moléculas são destruídas pela actividade biológica, a energia é transformada em novas moléculas ou é libertada para o exterior em forma de calor. Assim, a energia libertada na decomposição orgânica que suporta o processo de compostagem, origina a elevação de temperatura, que promove a redução de humidade que é pretendida no caso de substratos húmidos (Haug, 1993).

O calor libertado na decomposição da matéria orgânica aumenta a temperatura dos sólidos, da água e do ar no substrato em compostagem. A energia libertada também promove a evaporação da água, que é feita através dos gases de saída. Uma vez que o composto se encontra a temperaturas superiores às do exterior, existem perdas de calor das superfícies expostas do composto. Estas perdas são mitigadas pelo efeito de insulação do composto, que limita a condução de calor. Também podem ocorrer perdas durante os revolvimentos mecânicos das pilhas. A temperatura irá aumentar até ser atingido um estado estacionário (condições de equilíbrio). No entanto, as temperaturas de compostagem estão limitadas até temperaturas entre os 75 e 85°C, uma vez que a actividade biológica é reduzida pela inactivação térmica (Finstein e Hogan, 1993; Haug, 1993).

Os componentes do balanço de energia nos modelos de compostagem incluem o calor sensível dos componentes do sistema, o calor sensível dos fluxos de gás e de água (ar, vapor de água e água que entram no sistema, gases e vapores de saída do sistema), perdas condutivas e convectivas, entradas e saídas por radiação, calor latente de evaporação da

água e produção biológica de calor. No entanto, o termo correspondente à radiação é normalmente ignorado (Mason, 2006; Finstein *et al.*, 1986).

O balanço de energia difere bastante entre substratos húmidos e substratos secos. A necessidade de evaporação de água impõe exigências de energia que tem de ser fornecida pelos substratos. O calor gerado pela população de microrganismos é removido da pilha principalmente através da evaporação da água. O calor latente de vaporização é o termo dominante da energia libertada, mesmo em substratos secos e normalmente representa 75% da energia libertada (Mason, 2006; Haug, 1993; Finstein *et al.*, 1987a; Finstein, 1980).

3.7. Estabilidade e maturação do produto composto

São muitos os critérios referidos pelos investigadores, que podem ser utilizados como determinantes na avaliação da estabilidade e da maturação do composto. Estes são dois dos principais objectivos de estudo da compostagem, na actualidade. De maneira geral existe consenso entre os autores ao defenderem que a maturação e estabilização do composto são ambos parâmetros importantes para a avaliação de qualidade do composto.

No entanto, os termos estabilidade e maturidade são muitas vezes confundidos e utilizados da mesma forma para descrever o grau de decomposição e transformação da matéria orgânica na compostagem, não tendo em conta que estes parâmetros descrevem diferentes propriedades do composto (Gómes-Brandóm *et al.*, 2008).

Segundo Haug (1993), a definição de estabilização refere-se à oxidação da matéria orgânica ou à sua conversão numa forma mais difícil de degradar. Como foi referido anteriormente, durante a oxidação das substâncias orgânicas, levada a cabo pelos microrganismos, dá-se a libertação de energia. Uma parte dessa energia é capturada pelos próprios microrganismos e

3. Revisão Bibliográfica

utilizada na síntese de novos materiais, a partir dos substratos, para serem utilizados na produção de células novas. Este processo é repetido sucessivamente pelos microrganismos e a matéria orgânica que se vai mantendo é cada vez mais resistente à degradação biológica. Ou seja, a matéria que está a ser degradada é a fracção mais facilmente degradável do substrato. Quanto mais estáveis forem os compostos que permanecem no fim da compostagem, mesmo sendo ainda degradáveis, mais lenta será a taxa de degradação comparada com a do substrato original.

Gómes-Brandóm *et al.* (2008) e Gómez e Lima (2006) consideram que a estabilidade pode ser definida como a extensão a que os materiais facilmente biodegradáveis foram degradados. Um material considera-se instável se contiver uma proporção elevada de matéria biodegradável que possa provocar uma grande actividade microbiológica. Se o material contiver principalmente matéria húmica, não é capaz de suportar actividade microbiológica e é então considerado estável. Assim a estabilidade também pode ser utilizada para a monitorização do processo e na avaliação em diferentes sistemas de compostagem.

São inúmeros os critérios referidos para determinar o grau de estabilização do composto. Entre eles são incluídos, os testes de auto aquecimento e os testes respirométricos, como por exemplo a taxa de consumo de oxigénio ou a taxa de produção de dióxido de carbono (Gómes-Brandóm *et al.*, 2008; Adani *et al.*, 2001).

O grau de maturação do composto refere-se não só ao grau de decomposição das substâncias fitotóxicas produzidas durante a fase activa do processo de compostagem, como à ausência de microrganismos patogénicos e a viabilidade de germinação de sementes do composto (Gómes-Brandóm *et al.*, 2008). Ou seja, o grau de maturação de um composto é

normalmente utilizado para descrever a qualidade do composto para um dado uso final, como por exemplo para fins agrícolas (Gómez e Lima, 2006).

Assim o grau de maturação, pode ser determinado através de testes de fitotoxicidade, mudança das características de odor e de cor durante a compostagem, declínio da temperatura no fim da compostagem, a percentagem de matéria orgânica medida em sólidos voláteis e razão C/N (Gómes-Brandóm *et al.*, 2008; Haug, 1993). Segundo Haug (1993) estes parâmetros devem ser determinados em conjunto e um parâmetro por si só não confirma o grau de maturação do composto.

3.8. Testes Respirométricos

A respiração pode ser considerada como uma medição global da actividade biológica. Pode providenciar análises científicas, de confiança e repetíveis, da actividade dos microrganismos. Por esta razão, a respirometria (determinação da taxa de produção de CO₂ e da taxa de consumo de O₂) tem sido utilizada largamente na avaliação da actividade microbiológica e por isso na estabilidade dos substratos em compostagem. Actualmente são utilizadas diferentes técnicas respirométricas para avaliar a actividade microbiológica no composto através da determinação índices de respiração (Gómez e Lima, 2006; Tchobanoglous e Kreith, 2002).

Os Índices de Respiração (IR) definem-se como a taxa de consumo de O₂ ou de produção de CO₂ de uma amostra em condições específicas (Gómez e Lima, 2006; Adani *et al.*, 2003; Adani *et al.*, 2001).

3. Revisão Bibliográfica

Como foi referido anteriormente, para além do consumo de O₂ e da produção de CO₂, pode ainda estimar-se indirectamente a actividade respirométrica através do calor libertado durante o processo.

No teste de auto-aquecimento é efectuada a medição da temperatura máxima atingida devida à libertação de calor através da actividade microbiológica e química da amostra de composto. É um teste simples de implementar e de analisar. Koenig e Bari (2000), compararam este teste com resultados baseados no consumo de O₂. Estes autores concluíram que o teste do auto-aquecimento é mais simples, menos dispendioso e mais sustentável que o teste baseado no consumo de O₂ e que os resultados são representativos do processo. Por outro lado Lasaridi *et al.* (2000) consideram que no início do processo o teste do auto-aquecimento não é representativo. Estes autores sugerem que este teste usado juntamente com testes de germinação é um método viável para a determinação da estabilidade e da maturação do composto final.

Os métodos baseados na produção de CO₂ são muitas vezes utilizados porque, os equipamentos são, de modo geral mais baratos e simples de ser utilizados (Gómez e Lima, 2006). A produção de CO₂ está directamente relacionada com a respiração aeróbia (Silveira, 1997). Entre os mais utilizados estão as células que medem de CO₂, técnicas de calorimetria e cromatografia gasosa (Gómez e Lima, 2006).

Segundo Adani *et al.* (2001) a desvantagem principal dos métodos baseados na produção de CO₂ é não fazerem a distinção entre o CO₂ aeróbio e anaeróbio.

Gómez e Lima (2006) consideram que se o ensaio for efectuada, com o controlo das condições aeróbias (através do arejamento), todo o CO₂ será produzido em condições aeróbias.

Por fim os testes respirométricos baseados no consumo de O_2 são dos métodos mais comuns para determinar a degradabilidade nos sistemas aeróbios. O objectivo destes testes é medir o consumo de oxigénio de modo a garantir as condições que evitem a limitação das taxas devido à falta de nutrientes, oxigénio, humidade, pH, ou inoculação por microrganismos inadequados (Buckley, 2001).

A forma das curvas de consumo de oxigénio, dos testes respirométricos referidos na literatura sugere fortemente uma equação de cinética de primeira ordem (Buckley, 2001; Haug, 1993). O mesmo pode ser aplicado no ajuste dos valores de CO_2 acumulado obtidos em testes respirométricos baseados na produção de CO_2 (Silveira, 1997).

Como já foi referido através da elaboração dos testes respirométricos são obtidos IR que para além de determinarem a estabilidade biológica do produto final e correcta caracterização do produto final permitem o desenvolvimento de sistemas mais eficientes. Entre os vários índices propostos na literatura, os testes respirométricos são já aceites como o método mais sustentável, sendo considerado um método padronizado para a determinação da estabilidade biológica (Baffi *et al.*, 2007; Adani *et al.*, 2003; Adani *et al.*, 2001; Scaglia *et al.*, 2000).

Adani *et al.* (2001) propôs um novo teste respirométrico para avaliar a estabilidade biológica, o Índice de Respiração Dinâmico (IRD). Este método dinâmico difere do modelo estático porque simplesmente garante o arejamento contínuo da biomassa.

3.9. Estratégias de gestão do ar

Segundo Finstein *et al.* (1986) para ser possível o correcto dimensionamento e controlo de um sistema de compostagem é necessária a determinação das taxas de decomposição. Entre os principais benefícios da maximização da taxa de decomposição encontram-se o controlo mais rápido dos odores associados ao processo e aos materiais em decomposição, o aumento das taxas de vaporização que resultam em resíduos com menor humidade, num período de tempo mais curto e menor quantidade de produto final, que facilita o transporte e armazenamento dos materiais. Assim, a taxa de decomposição influencia o custo e a eficiência do processo na fase de dimensionamento e de operação do sistema.

Os parâmetros que devem ser controlados durante o processo para garantir a maximização da taxa de decomposição são o calor produzido na decomposição da matéria orgânica, a temperatura, o arejamento e a humidade (Finstein *et al.*, 1980). Por um lado, a decomposição da matéria orgânica gera calor, o calor eleva as temperaturas que por sua vez aumentam as necessidades de arejamento. Assim, a intensidade de arejamento é função do calor produzido e consequentemente representa a intensidade da decomposição. Por outro lado, a decomposição da matéria orgânica gera calor, o calor resulta na vaporização da água que reduz a humidade. Ou seja, em alguns casos a diminuição da humidade pode ser indicativa da decomposição da matéria orgânica (Finstein *et al.*, 1986).

A escolha do tipo de arejamento que deve ser aplicado num sistema depende essencialmente do tipo de substrato, local de compostagem e dos custos de operação e de transporte (Haug, 1993).

Depois de ser determinada uma taxa de arejamento, pode ser escolhido o sistema de controlo para regular o arejamento (Haug, 1993). Parâmetros como a quantidade de

oxigénio no sistema, quantidade de dióxido de carbono libertado e medições de temperatura da pilha são algumas das estratégias de controlo que pode ser aplicadas (Ekinci, 2001).

Taxas de arejamento fixas podem ser controladas com sistemas de temporizador on e off para um dado período de tempo. Este tipo de estratégia tem normalmente como objectivo fornecer ar suficiente para satisfazer as necessidades de ar e por outro lado controlar a temperatura da pilha. No entanto, a temperatura nem sempre é mantida a valores óptimos e, nesse caso as taxas de degradação podem ser afectadas (Keener *et al.*, 2005; Finstein *et al.* e Rynk, referidos por Ekinci, 2001).

Outro método de controlo é a introdução de sondas de oxigénio ou dióxidos de carbono na pilha, ou a medição dos gases de saída. Este método pode ser utilizado para determinar o ar que deve ser fornecido e manter as percentagens de O₂ e CO₂ pretendidas (Ekinci, 2001).

O controlo do arejamento nos sistemas de compostagem é essencial para manter as temperaturas dentro de limites ideais. Na maioria dos casos se as necessidades de arejamento determinantes ao processo forem satisfeitas, sejam elas a necessidade de arejamento para reduzir a humidade ou para controlo da temperatura, são também cumpridas as necessidades de estequiométricas de oxigénio (Ekinci *et al.*, 2004; Das e Keener, 1997).

Segundo Finstein *et al.* (1987b) os sistemas de compostagem tendem a acumular calor em excesso, o que pode resultar em temperaturas elevadas que debilitam a actividade biológica. Nesses casos, o controlo do processo deve basear-se na remoção do calor em excesso. Estes autores analisaram uma série de casos de estudo e concluíram que o arejamento é o único método prático para se remover controladamente o calor.

3. Revisão Bibliográfica

Através da introdução de sondas de temperatura na pilha pode ser controlada a taxa de arejamento para serem mantidas as temperaturas pretendidas. Nestes casos, é utilizado um temporizador que regulada o arejamento e que torna possível o aumento da temperatura. Assim que a temperatura atinja um certo valor estipulado o temporizador aumenta o fluxo de ar para arrefecer a pilha (Ekinci, 2001).

4. Metodologia

4.1. Delineamento experimental

No decorrer do trabalho foram estudadas três Pilhas. Para ser verificado o efeito do estruturante nas necessidades de arejamento, procedeu-se à adição de casca de arroz, nas Pilhas 2 e 3.

As necessidades de arejamento do substrato para a estequiometria da reacção, redução da humidade e controlo da temperatura foram determinadas através do método referido por Haug (1993).

Utilizou-se como método secundário para a determinação das necessidades de arejamento a determinação de PCS. Através dos resultados obtidos foi estudada a relação entre humidade e calor.

Para avaliar o efeito da adição de casca de arroz no substrato e para apoio ao método adoptado para a determinação das necessidades de arejamento recorreu-se ainda à determinação de SV e a testes respirométricos de CO₂.

O Quadro 4.1 apresenta o delineamento experimental definido para o cumprimento dos objectivos.

Quadro 4.1 – Delineamento experimental.

Objectivo Geral	Objectivos específicos	Determinação	Análise	Pilhas	Amostras analisadas (dias)
Necessidades de ar	Estequiometria	Reacção estequiométrica	Análise elementar	Pilha 1, Pilha 2 e Pilha 3	Pilha 1 – 0, 17, 45, 80, 104
	Humidade	Humidade	ST		
		SV	Cinzas		
	Temperatura	Reacção estequiométrica	Análise elementar		
SV		Cinzas			
Humidade e Calor	Humidade	Humidade	ST		Pilha 2 – 0, 2, 6, 8, 13, 20, 27, 34 e 49
	Calor	Calor libertado do substrato, Q_i	PCS		
		Energia libertada na reacção, E_i	Análise elementar		
		Calor libertado na evaporação da água	ST		
Análise elementar					
Cinética microbiana	SVB	SV	Cinzas	Pilha 3 – 0, 2, 6, 8, 13, 20, 27, 34, 49 e 75	
	Produção de CO_2	Medições de CO_2	Reactor		

Foram analisadas as amostras do dia 0, com e sem casca, para as Pilhas 2 e 3.

4.2. Instalações experimentais

4.2.1. Instalação piloto à escala real

Os ensaios em campo foram realizados na Instalação de Compostagem à escala de Demonstração situada no Centro Experimental de Pegões, no âmbito do Projecto de parceria com a Luságua Ambiente, Serviços Ambientais, SA e o Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, DCEA/FFCT/UNL.

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentadas imagens da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração.



Figura 4.1 – Posto de controlo da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração



Figura 4.2 – Área de Compostagem 1 (Sul) da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração



Figura 4.3 – Área de Compostagem 2 (Norte) da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração



Figura 4.4 – Ventilador 2 da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração



Figura 4.5 – Válvula do Ventilador 2 da Instalação de Compostagem à escala de Demonstração

4.2.2. Instalação piloto em laboratório

Os ensaios para a determinação dos valores de CO₂ foram efectuados à escala laboratorial numa instalação piloto desenvolvida por Silveira (1997). Esta instalação simula as condições de compostagem num reactor *batch*. Também segundo este autor, a taxa de produção de CO₂ determinada a partir destes reactores está directamente relacionada com a degradação da matéria orgânica.

Os cinco componentes que a instalação piloto contém são, os reactores biológicos, a linha de ar, o sistema de controlo de temperatura, aparelhos de medida e o sistema de comando e aquisição de dados (Silveira, 1997).

4.2.3. Substratos

O substrato utilizado no ensaio da Pilha 1, foi lama digerida, proveniente de suinicultura. No caso das Pilhas 2 e 3, utilizou-se uma mistura de lama digerida, proveniente de suinicultura e casca de arroz (95/5% e 96/4%, respectivamente).

As lamas utilizadas nos ensaios foram fornecidas por duas suiniculturas diferentes, Manuel R. Cândido, LDA, Alcanhões, Santarém (Pilha 1 e 2) e António José Silveira, Herdeiros, Quinta Penha da Lapa, 2550-251 Cercal (Pilha 3). No entanto, o modo de tratamento em ambas a

suiniculturas é muito semelhante e é constituído por digestão anaeróbia seguida de separação de sólidos (resíduos de gradagem fina), seguido do tratamento do efluente em lagoas em série.

4.3. Trabalho experimental

4.3.1. Recolha das amostras

A recolha de amostras das Pilhas 2 e 3 foi desenvolvida entre 23 de Julho de 2008 e 6 de Outubro de 2008. Foram recolhidas duas amostras semanais, até dia 31 de Julho e depois procedeu-se a apenas uma recolha semanal até à finalização das pilhas.

Em ambas as pilhas, as amostras foram recolhidas em diversos pontos, de modo a obter-se uma amostra representativa de toda a pilha. Em cada dia de recolha foram recolhidos de cada pilha, cerca de 10 a 15kg de amostra (Peso das pilhas apresentado no Anexo XI).

As pilhas foram revolvidas duas vezes por semana até 27 de Agosto e uma vez por semana até dia 10 Setembro. No dia 10 de Setembro é terminada a Pilha 2, no entanto a Pilha 3 mantém-se em estado de maturação até dia 6 de Outubro e nesse dia foi feito o último revolvimento.

A recolha de amostras da Pilha 1 não foi do âmbito deste trabalho, apenas se procedeu ao tratamento de resultados, da mesma. No entanto, o Quadro 4.2 apresenta o cronograma com a calendarização das recolhas de amostras e dos revolvimentos da Pilha 1.

Quadro 4.2 – Revolvimentos e das recolhas de amostras da Pilha 1.

Dias	Revolvimento	Recolha de amostras
	Pilha 1	
0	✓	✓
2	✓	
7	✓	
10	✓	✓
13	✓	✓
17	✓	✓
21	✓	✓
23	✓	
30	✓	
37	✓	
45	✓	✓
51	✓	
61	✓	✓
66	✓	
80	✓	✓
104	✓	✓

No Quadro 4.3 é apresentado o cronograma com a calendarização das recolhas de amostras e dos revolvimentos referentes às Pilhas 2 e 3.

Quadro 4.3 – Revolvimentos e das recolhas de amostras das Pilhas 2 e 3.

Dias	Revolvimento		Recolha de amostras	
	Pilha 2	Pilha 3	Pilha 2	Pilha 3
0	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓
6	✓	✓	✓	✓
8	✓	✓	✓	✓
13	✓	✓	✓	✓
16	✓	✓		
20	✓	✓	✓	✓
22	✓	✓		
27	✓	✓	✓	✓
30	✓	✓		
34	✓	✓	✓	✓
37	✓	✓		
43	✓	✓		
49	✓	✓	✓	✓
75		✓		✓

Utilizou-se no âmbito desta dissertação um sistema não reactor em que as pilhas foram reviradas periodicamente e onde foi utilizado um sistema de arejamento forçado.

Nos Quadros 4.4 e 4.5 são apresentadas as datas de arejamento e respectivos caudais das Pilhas 1, 2 e 3.

Quadro 4.4 – Arejamento da Pilha1.

Dias	$Q_{ar} (m^3 \cdot h^{-1})$	
	Pilha 1	
0 - 7	200	
7 - 10		
10 - 13	200	
13 - 61	100	
61 - 104		

Quadro 4.5 – Arejamento das Pilhas 2 e 3.

Dias	$Q_{ar} (m^3 \cdot h^{-1})$	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 6	100	
6 - 8	120	
8 - 75		

4.3.2. Preparação das amostras

Nos dias de recolha de amostras foram determinados o pH, a condutividade, na amostra húmida e as amostras eram secas na estufa, a $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, para a determinação da humidade. No dia que se seguia à recolha as amostras eram retiradas da estufa e pesadas. De seguida, a partir das amostras secas determinavam-se os sólidos voláteis.

Para as determinações do Poder Calorífico Superior, PCS e da composição elementar, procedeu-se previamente à trituração das amostras, com o objectivo de se obter sub-amostras mais homogéneas. As amostras foram trituradas até se obter uma granulometria de 1 mm, utilizando um moinho ultracentrífugo, do modelo LM1, da Retsch.

4.4. Métodos analíticos

O resumo dos métodos e equipamentos utilizados para a caracterização físico-química das amostras é apresentado, no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Métodos de análise

Parâmetro	Método	Equipamento
pH	EN - 12176	Balança AND GF-3000-EC, Placa de aquecimento VELP-Scientifica-ARE e Startorius PB-11
Condutividade	Task force 151 and Project Horizontal, 2005	Balança AND GF-3000-EC e Eléctrodo Orion 4 STAR
Humidade e Humidade residual	EN - 12880	Balança AND GF-3000-EC e estufa CASSEL
Cinzas	EN - 12879	Balança AND GF-3000-EC, estufa CASSEL e Carbolite
Poder Calorífico Superior (PCS)	De acordo com o manual de Instruções	Balança OHAUS Scout-Pro, Bomba calorimétrica ISCO Calorimat e Auto charger - Parr
Análise Elementar (CHNS - O)	De acordo com o manual de Instruções	Balança STARTORIUS Micro, Analisador Elementar CNHS - O e Registador integrador, DP200 da Carlo Erba Instruments

O Oxigénio foi calculado por diferença dos valores obtidos de Carbono, Azoto, e Hidrogénio

No ANEXO I são apresentadas as imagens dos aparelhos utilizados durante os diversos ensaios.

4.5. Métodos de cálculo

4.5.1. Determinação da Humidade

O cálculo da humidade (%), foi feito através da Equação 4.1:

$$\text{Humidade} = 100 - ST$$

(Equação 4.1)

Onde,

ST – teor de sólidos totais (%).

4.5.2. Determinação do teor de sólidos voláteis

O teor de sólidos voláteis, SV (% ps) foi determinado a partir dos valores obtidos de cinzas, através da Equação 4.2:

$$SV = 100 - Cinzas$$

(Equação 4.2)

4.5.3. Determinação do Poder Calorífico Superior

Poder Calorífico Superior (PCS) foi determinado, não da forma constante do manual, mas sim através dos cálculos apresentados nas Equações 4.3, 4.4 e 4.5:

a) Capacidade calorífica do aparelho (W), em cal/g:

$$W = \frac{C_{AB} \times m_{AB} + (e_1 + e_2)}{t_{cor}}$$

(Equação 4.3)

Onde,

C_{AB} – calor de combustão do Ácido Benzóico (6318 cal.g^{-1});

m_{AB} – massa de amostra de Ácido Benzóico (g);

e_1 – correcção para o calor de formação do ácido nítrico (cal);

e_2 – correcção para o calor de combustão do fio de ignição (cal);

t_{cor} – correcção para a elevação da temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

b) Correcção para a elevação da temperatura:

$$t_{cor} = t_c - t_a - r_1 \times (b_{bc} - a_{bc}) - r_2 \times (c_{bc} - b_{bc})$$

(Equação 4.4)

Onde,

a_{bc} – tempo referente ao início da ignição (min);

b_{bc} – tempo a que a temperatura alcança 60% de elevação total (min);

c_{bc} – tempo após a elevação onde a temperatura se torna constante (min);

r_1 – taxa de elevação da temperatura durante 5 minutos antes da ignição ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$);

r_2 – taxa de elevação da temperatura durante 5 minutos após o tempo c ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$);

t_c – temperatura no tempo c ($^{\circ}\text{C}$);

t_a – temperatura no tempo a ($^{\circ}\text{C}$).

c) Poder Calorífico Superior (PCS), em $\text{cal} \cdot \text{g}^{-1}$:

$$PCS = \frac{W \times t_{cor} - (e_1 + e_2 + e_3)}{m_{AB}}$$

(Equação 4.5)

Onde,

e_3 – correcção para o calor de formação de ácido sulfúrico = 0.

4.5.4. Determinação do teor em Oxigénio

O teor em Oxigénio (O), expresso em percentagem de peso seco e base de cinzas constante foi determinado a partir dos resultados de Carbono, C (%), Hidrogénio, H (%) e Azoto, N (%) obtidos através da análise elementar, pela Equação 4.6:

$$O = 100 - \text{Cinzas} - (C + H + N)$$

(Equação 4.6)

4.6. Desenvolvimento do modelo

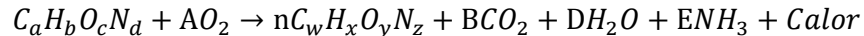
4.6.1. Necessidades de arejamento

A metodologia utilizada para calcular as necessidades de oxigénio durante o processo de compostagem foi adaptada de Haug (1993) e é apresentada de seguida.

4.6.1.1. Determinação da necessidade estequiométrica de ar

A determinação a necessidade estequiométrica de oxigénio, $N_{o,e}$, baseou-se na composição inicial e final do substrato, no entanto para ser possível a comparação dos resultados experimentais, optou-se por transformar os mesmos em peso seco e em base de cinzas constante (ps bcc).

Assim a degradação do substrato inicial é representada pela equação estequiométrica 4.7, (adaptada de Rich, referido por Haug, 1993 e Tchobanoglous *et al.*, 1993).



(Equação 4.7)

Onde,

$C_a H_b O_c N_d$ – composição inicial do substrato;

$C_w H_x O_y N_z$ – composição final do substrato;

n – número de moles formadas de composto, por uma mole de substrato;

A – número de moles de oxigénio consumidas na reacção

B – número de moles de CO_2 libertadas

D - número de moles de H_2O produzidas

E - número de moles de NH₃ libertadas

O número de moles formadas de composto, por uma mole de substrato, n (kmol), foi determinado a partir da Equação 4.8:

$$n = \frac{P_f}{PM[C_w H_x O_y N_z] \times P_{fo,i}}$$

(Equação 4.8)

Em que,

P_f – peso do composto final (kg SV ps bcc).

O peso da fracção orgânica inicial, P_{fo,i} (kmol) foi determinado a partir da Equação 4.9:

$$P_{fo,i} = \frac{P_i}{PM[C_a H_b O_c N_d]}$$

(Equação 4.9)

Onde,

P_i – peso inicial do substrato (kg SV ps bcc).

O oxigénio que deve ser fornecido ao processo para satisfazer a necessidade estequiométrica de oxigénio, O_e (kg) foi determinado através da Equação 4.10:

$$O_e = A \times P_{fo,i} \times PM[O_2]$$

(Equação 4.10)

Onde,

PM [O₂] – peso molecular do O₂, e é igual a 32kg.kmol⁻¹.

A necessidade de oxigénio para satisfazer a necessidade estequiométrica, N_{o,e} (em g O₂.g⁻¹ substrato ps) foi determinada através da Equação 4.11:

$$N_{o,e} = \frac{O_e}{P_i}$$

(Equação 4.11)

O ar necessário para satisfazer a necessidade estequiométrica, ar_e (g ar seco.g⁻¹ substrato ps), foi determinado através da Equação 4.12.

$$ar_e = \frac{N_{o,e}}{Pm_{o,ar}}$$

(Equação 4.12)

Onde,

Pm_{o,ar} – percentagem mássica de oxigénio no ar e é igual a 0,232.

O ar necessário para satisfazer a necessidade estequiométrica acumulado, ar_{e,acumulado} (kg), foi determinado através da Equação 4.13.

$$ar_{e,acumulado} = \sum ar_e \times P_{degradado}$$

P_{degradado} – peso do substrato degradado (kg ps bcc).

(Equação 4.13)

4. Metodologia

O ar necessário para satisfazer a necessidade estequiométrica por unidade de tempo, ar_e ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{dg} \cdot \text{d}^{-1}$), foi determinado através da Equação 4.14.

$$ar_{e,m} = \frac{ar_e}{n_{\text{dias}}}$$

(Equação 4.14)

n_{dias} – número de dias de compostagem.

O peso de substrato degradado $P_{\text{degradado}}$ (kg), foi determinado através da Equação 4.15.

$$P_{\text{degradado}} = P_f - P_i$$

(Equação 4.15)

4.6.1.2. Determinação da necessidade de ar para redução da humidade

O valor de peso de ar necessário para remover a humidade, ar_h (g ar seco. g^{-1} substrato ps) foi determinado pela Equações 4.16:

$$ar_h = \frac{Ag_{rem}}{h_{rem}}$$

(Equação 4.16)

Ag_{rem} – água removida (g água. g^{-1} substrato ps);

h_{rem} – humidade removida do sistema, pelos gases de saída, (g água. g^{-1} ar seco).

Para determinar a água removida, Ag_{rem} (g água.g⁻¹ substrato ps), recorreu-se à Equação 4.17. Neste cálculo foi considerado que a fracção de cinzas é conservativa. Não foi considerado o peso de água produzida.

$$Ag_{rem} = \left[\frac{(1 - ST_s)}{ST_s} \right] - \left[\frac{(1 - SV_s)}{(1 - SV_c)} \right] \times \left[\frac{(1 - ST_c)}{ST_c} \right]$$

(Equação 4.17)

Em que,

ST_s e ST_c – sólidos totais do substrato e do composto, respectivamente (% ps);

SV_s e SV_c – sólidos voláteis do substrato e do composto respectivamente (% ps).

A humidade removida do sistema, pelos gases de saída, h_{rem} (g água.g⁻¹ ar seco) foi determinada pela Equação 4.18:

$$h_{rem} = he_s - he_e$$

(Equação 4.18)

Em que,

he_s e he_e – humidade específica de saída e de entrada do sistema, respectivamente (g água.g⁻¹ ar seco).

A humidade específica, he (g água.g⁻¹ ar seco), foi determinada pela Equação 4.19.

$$he = \left(\frac{PM[\text{água}]}{PM[\text{ar seco}]} \right) \times \left[\frac{PV}{(P_a - PV)} \right]$$

(Equação 4.19)

Onde,

PM [água] – peso molecular da água (18 g.mol^{-1});

PM [ar seco] – peso molecular do ar seco (29 g.mol^{-1});

P_a – pressão atmosférica, 760mmHg.

A pressão de vapor foi corrigida, para a pressão de vapor da água real (PV, em mmHg), através da Equação 4.20:

$$PV = HR_{ar} \times (PSV)$$

(Equação 4.20)

Onde,

HR_{ar} – humidade relativa, da fracção de pressão de vapor de saturação, igual a 1 se o ar estiver saturado, considerado à saída (considerou-se a humidade relativa do ar não saturado 0,75, entrada).

A pressão de saturação do vapor, PSV (mmHg) é função da temperatura e pode ser modelada matematicamente pela equação de Antoine, Equação 4.21 (Weber, referido por Haug, 1993):

$$\log_{10} PSV = \frac{a_a}{T_a} + b_a$$

(Equação 4.21)

Em que,

a_a e b_a – constantes para a água e são respectivamente -2238 e 8,896;

T_a – temperatura absoluta do vapor (°K).

O valor de peso de ar acumulado necessário para remover a humidade, $ar_{h,acumulado}$ (kg), foi determinado através da Equação 4.22.

$$ar_{h,acumulado} = \sum ar_h \times P_{degradado}$$

(Equação 4.22)

O ar necessário para remover a humidade por unidade de tempo, ar_h (kg.kg⁻¹dg.d⁻¹), foi determinado através da Equação 4.23.

$$ar_{h,m} = \frac{ar_h}{n_{dias}}$$

(Equação 4.23)

4.6.1.3. Necessidade de ar para o controlo da temperatura

Recorrendo ao Sistema de Equações 4.24 pôde determinar-se o valor de ar necessário para libertar o calor, ar_t (g ar seco.g⁻¹ substrato ps), apresentado na Equação 4.25.

$$\begin{cases} CV_{20^\circ C} = (ar_t) \times (h_{rem}) \times (CVA_{20^\circ C}) \\ C_{vp,ep} = (ar_t) \times (he_e) \times (CE_{vp}) \times (T_s - T_e) \\ C_{ar,s} = (ar_t) \times (CE_{ar}) \times (T_s - T_e) \end{cases}$$

(Equação 4.24)

$$ar_t = \frac{CL}{(CV_{20^\circ C} + C_{vp,ep} + C_{ar,s})}$$

(Equação 4.25)

4. Metodologia

Em que,

$CV_{20^{\circ}\text{C}}$ – calor de vaporização dos gases de saída a 20°C , em cal.g^{-1} de ar;

$CVA_{20^{\circ}\text{C}}$ – calor de vaporização da água a 20°C e é igual a $585,8\text{cal.g}^{-1}$;

$C_{\text{vp,ep}}$ – calor de vapor da água que entra e do gás que evapora a 55°C , em cal.g^{-1} de ar;

CE_{vp} – calor específico do vapor de água e é igual a $0,44\text{cal.g}^{-1}\text{C}^{-1}$;

T_s e T_e – temperaturas de saída e entrada do gás, 55 e 20°C , respectivamente;

$C_{\text{ar,s}}$ – calor sensível do ar seco a 55°C , cal.g^{-1} de ar;

CE_{ar} – calor específico do ar e igual a $0,24\text{cal.g}^{-1}\text{C}^{-1}$.

O calor libertado, CL , em cal.g^{-1} ps é determinado a partir da Equação 4.26:

$$CL = N_{o,c} \times CC_{O_2}$$

(Equação 4.26)

Onde,

CC_{O_2} - calor de combustão, por electrão transferido de oxigénio a uma ligação tipo metano e é igual a $3360\text{cal.g}^{-1} O_2$.

A necessidade de oxigénio para libertar o calor, $N_{o,c}$ (em $\text{g } O_2.\text{g}^{-1}$ substrato ps) foi determinada através da Equação 4.27:

$$N_{o,c} = SVB_r \times N_{o,e}$$

(Equação 4.27)

Onde,

SVB – sólidos voláteis biodegradáveis (g.g^{-1} SV).

O teor em SVB (g SVB.g^{-1} SV ps bcc) foi determinado através da Equação 4.28:

$$SVB = \frac{(SV_s - SV_c)}{SV_s}$$

(Equação 4.28)

Em que,

SV_s – sólidos voláteis no substrato (% ps bcc) (determinados através da Equação 4.2);

SV_c – sólidos voláteis no final em base de cinzas constante (% ps bcc).

A redução do teor de sólidos voláteis, SVB_r (g SVB.g^{-1} SV ps bcc) foi determinada através da Equação 4.29.

$$SVB_r = \Delta SVB$$

(Equação 4.29)

Sabendo que a evolução da degradação dos SVB representa a evolução da degradação aeróbia dos resíduos orgânicos, optou-se por utilizar o método dos mínimos quadrados como ajuste matemático do modelo cinético de primeira ordem, traduzindo assim a oxidação biológica da matéria orgânica (Equação 4.30 – adaptada de Paredes *et al.*, referidos por Mason 2006):

$$SVB_a = SVB_0 \times (1 - e^{-k_{SVB}t})$$

(Equação 4.30)

Onde,

SVB_a – quantidade acumulada de SVB ($g\ SVB.g^{-1}\ SV\ ps\ bcc$);

SVB_0 – quantidade máxima acumulada de SVB ($g\ SVB.g^{-1}\ SV\ ps\ bcc$);

k_{SVB} – constante de velocidade de degradação de primeira ordem (d^{-1});

t – tempo (d).

O progresso da degradação pode ser descrito pela velocidade de degradação. A velocidade de degradação determinada a partir dos valores de SVB, v_{SVB} ($g\ SVB.g^{-1}\ SV\ ps\ bcc.d^{-1}$), foi calculada a partir da Equação 4.31:

$$v_{SVB} = \frac{SVB_r}{dt}$$

(Equação 4.31)

O valor de ar necessário para libertar o calor acumulado, $ar_{t,acumulado}$ (kg), foi determinado através da Equação 4.32.

$$ar_{t,acumulado} = \sum ar_t \times P_{degradado}$$

(Equação 4.32)

O ar necessário para libertar o calor por unidade de tempo, ar_t ($kg.kg^{-1}dg.d^{-1}$), foi determinado através da Equação 4.33.

$$ar_{t,m} = \frac{ar_t}{n_{dias}}$$

(Equação 4.33)

4.6.1.4. Determinação das Taxas e Picos de arejamento

Recorreu-se à Equação 4.34 para determinar a taxa de arejamento média, $TA_{méd}$ ($m^3 \cdot h^{-1} Kg^{-1}$ substrato ps bcc).

$$TA_{méd} = \frac{ar}{PE_{ar} \times n_{dias} \times 24}$$

(Equação 4.34)

Onde,

ar – ar necessário para satisfazer qualquer uma das necessidades (kg);

PE_{ar} – peso específico do ar (a 25°C e a 1 atm e é igual a $1,2 kg \cdot m^{-3}$);

4.6.2. Determinação do valor teórico de energia libertada na reacção

Através da análise elementar do substrato e recorrendo à determinação do grau de redução da matéria orgânica R (Equação 4.39) e ao calor de combustão teórico Q ($cal \cdot g^{-1}$) (Equação 4.38) estimou-se um valor teórico de energia libertada com o calor, E_l (cal) (Equação 4.35).

$$E_l = E_s - E_e = cal$$

(Equação 4.35)

Onde,

E_e – a energia que entra no sistema (cal);

E_s – a energia que sai do sistema (cal).

Os valores de E_e e E_s , são determinados com base em Q_s (calor de combustão teórico do substrato, $cal \cdot g^{-1}$), P_i (peso do substrato inicial, kg SV ps bcc) e Q_c (calor de combustão

4. Metodologia

teórico do composto, cal.g^{-1}), P_f (peso do composto final, kKg SV ps bcc), respectivamente, através das Equações 4.36 e 4.37.

$$E_e = Q_s \times 1000 \times P_i$$

(Equação 4.36)

$$E_s = Q_c \times 1000 \times P_f$$

(Equação 4.37)

O calor de combustão teórico, Q (cal.g^{-1}) foi determinado a partir da Equação 4.38:

$$Q = 127R + 400$$

(Equação 4.38)

O grau de redução da matéria orgânica R foi determinado através da Equação 4.39:

$$R = 100[2,66(C) + 7,94(H) - (O)]/398,9$$

(Equação 4.39)

Em que,

C , H e O - As percentagens de Carbono, Hidrogénio e Oxigénio, respectivamente.

4.6.3. Determinação das taxas de libertação de calor

O calor latente, determinado a partir do PCS, Q_{latente} (kcal) foi determinado a partir da Equação 4.40:

$$Q_{\text{latente}} = PCS \times P_n \times 1000$$

(Equação 4.40)

Onde,

P_n – peso da pilha, num dado momento, n (kg ps bcc).

O calor libertado, do substrato, determinado, Q_l (kcal) foi determinado a partir da Equação 4.41:

$$Q_l = \Delta Q_{latente}$$

(Equação 4.41)

Recorreu-se à Equação 4.42 para determinar a taxa de libertação de calor latente, Taxa Q_l (kcal.h⁻¹kg⁻¹ ps bcc).

$$Taxa Q_l = \frac{Q_l}{(n_{dias} \times 24 \times P_{degradado})}$$

(Equação 4.42)

O calor utilizado na evaporação da água, $C_{evp,água}$ (kcal) foi determinado através da Equação 4.43:

$$C_{evp,água} = Pa_{perdida} \times CL_{vp,água} + Pa_{perdida} \times CE_{água} \times (T_s - T_e)$$

(Equação 4.43)

Onde,

$Pa_{perdida}$ – peso de água perdida, kg (Equação 3.35);

$CE_{água}$ – calor específico da água, igual a 1 cal.g⁻¹.

$CL_{vp,água}$ – calor latente de vaporização da água, a 55°C, iguala 566,1cal.g⁻¹.

O Peso de água perdida, $P_{a_{perdida}}$ (kg) foi determinado a partir da Equação 4.44:

$$P_{a_{perdida}} = P_{\acute{a}gua,subs} + P_{\acute{a}gua,produzido} - P_{\acute{a}gua,comp}$$

(Equação 4.44)

Onde,

$P_{\acute{a}gua,subs}$ e $P_{\acute{a}gua,comp}$ – peso de água no substrato e no composto respectivamente, kg.

$P_{\acute{a}gua,prod}$ – peso de água produzida durante o processo, kg.

Para determinar a taxa de libertação com a perda de água, Taxa $C_{evp,\acute{a}gua}$ ($\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ps bcc), recorreu-se à Equação 4.45:

$$\text{Taxa } C_{evp,\acute{a}gua} = \frac{C_{evp,\acute{a}gua}}{(n_{dias} \times 24 \times P_{degradado})}$$

(Equação 4.45)

4.6.4. Determinação da taxa de produção de CO_2

A expressão utilizada para o cálculo da taxa de produção de CO_2 , em $\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$, baseada nas determinações dos reactores biológicos do laboratório é apresentada na Equação 4.46 (Silveira, 1997):

$$CO_2 = \frac{Q_{ar,r} \times 60 \times (CO_2 - 0,03) \times 44}{10^5 \times 22,4}$$

(Equação 4.46)

Onde,

$Q_{ar,r}$ – caudal de ar, em $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$, medição (mássica)

CO_2 – concentração de CO_2 à saída dos reactores, % v.v⁻¹.

A variação de humidade inicial fez variar a quantidade inicial de lama, em peso seco, nos reactores, entre cada ensaio. Assim, para que os resultados pudessem ser comparados optou-se por exprimir os resultados de taxa de produção de CO_2 em $\text{g CO}_2\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ peso seco de lama no início (Travassos, 2006).

Sabendo que a evolução da produção acumulada de CO_2 representa a evolução da degradação aeróbia dos resíduos orgânicos, optou-se por utilizar o método dos mínimos quadrados como ajuste matemático do modelo cinético de primeira ordem, traduzindo assim a oxidação biológica da matéria orgânica (Equação 4.47):

$$CO_{2,a} = CO_{2,0} \times (1 - e^{-k_{CO_2}t})$$

(Equação 4.47)

Onde,

$CO_{2,a}$ – quantidade acumulada de CO_2 produzido ($\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$ ps);

$CO_{2,0}$ – quantidade máxima acumulada de CO_2 ($\text{g CO}_2\cdot\text{g}^{-1}$ ps);

k_{CO_2} – constante de velocidade de degradação de primeira ordem (h^{-1});

t – tempo (h).

4. Metodologia

O progresso da degradação pode ser descrito pela velocidade de degradação. A velocidade de degradação determinada a partir dos valores de CO_2 , v_{CO_2} ($g\ CO_2 \cdot g^{-1}\ ps \cdot h^{-1}$), foi calculada a partir da Equação 4.48:

$$v_{CO_2} = \frac{\Delta CO_2}{dt}$$

(Equação 4.48)

5. Apresentação e Discussão de Resultados

5.1. Caracterização das Lamas

A composição físico-química das lamas utilizadas no processo de compostagem das Pilhas 1, 2 e 3 é apresentada no Quadro 5.1 (valores médios obtidos com base nos Quadros dos Anexos II, IV, V, VI e VII).

Quadro 5.1 – Composição Físico-química das Lamas 1, 2 e 3.

Composição físico-química	Lamas		
	1	2	3
pH	8,39	8,91	8,69
Condutividade ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	-	1277,50	1317,50
Humidade (%)	78,39	68,88	76,64
Cinzas (% ps)	11,18	25,00	31,54
Sólidos Voláteis (% ps)	88,82	75,00	68,46
PCS (cal.g^{-1} ps)	4375	3458	3346

O valor de condutividade da Lama 1 não foi âmbito do estudo

Como foi referido no Capítulo 3, da Metodologia, foram efectuados ensaios para determinar a composição elementar das amostras de lamas, nos vários períodos de amostragem e inclusive no fim do processo de compostagem. Estes ensaios tiveram como objectivo verificar a disponibilidade de N e C (razão C/N) e permitir o cálculo da necessidade estequiométrica de oxigénio, necessidade de oxigénio para redução de humidade e a necessidade de oxigénio para o controlo da temperatura.

No Quadro 5.2, são apresentados os resultados da composição elementar das Lamas 1, 2 e 3 e no Quadro 5.3 são apresentados valores de razão C/N (valores médios obtidos com base nos Quadros dos Anexos III e V).

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Quadro 5.2 – Composição Elementar das Lamas 1, 2 e 3.

Composição Elementar	Lamas		
	1	2	3
C (%ps bcc)	46,22	37,15	32,14
H (%ps bcc)	7,34	4,94	4,22
O (%ps bcc)	44,01	57,62	61,50
N (%ps bcc)	1,91	2,37	2,15

Quadro 5.3 – Razão C/N das Lamas 1, 2 e 3.

Lamas	Razão C/N
1	28
2	21
3	17

Os valores da razão C/N iniciais, apresentados no Quadro 5.3 diferem bastante entre si, esta diferença poderá dever-se ao facto da Lama 3, ter sido recolhida de um produtor diferente das Lamas 1 e 2. No caso das lamas 1 e 2 pode dizer-se que a diferença entre valores iniciais de C/N, poderá dever-se não só a diferentes tempos de residência no digestor, como poderá ser devido ao diferente tempo permanência das lamas no contentor antes de serem transportadas da suinicultura até ao local de ensaio, no Centro Experimental de Pegões.

Tomando em consideração as diferenças nas características iniciais das lamas será de prever a variação nos resultados ao longo do processo de compostagem, uma vez que as condições referidas anteriormente, são fundamentais no decorrer do processo.

5.2. Caracterização dos substratos

No âmbito da presente dissertação, o trabalho de campo, envolveu a compostagem das Lamas 2 e 3 com a adição de casca de arroz, nas proporções de 95/5% e 96/4% em peso húmido, respectivamente. Uma vez que a compostagem da Lama 1 não envolveu a adição de

casca de arroz como estruturante, os valores de caracterização do substrato 1 são os mesmos da Lama 1. Assim remetem-se esses mesmos valores para o subcapítulo 5.1.

Os dados de caracterização físico-química (valores médios obtidos com base nos Quadros dos Anexos II, IV, V, VI e VII), composição elementar e razão C/N (valores médios obtidos com base nos Quadros do Anexo III), dos substratos iniciais 2 e 3, são apresentados nos Quadros 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente.

Quadro 5.4 – Composição Físico-química dos Substratos 2 e 3.

Composição físico-química	Substrato	
	2	3
pH	8,81	8,64
Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1391,50	1260,50
Humidade (%)	68,04	72,49
Cinzas (% ps)	22,40	29,81
Sólidos Voláteis (% ps)	77,60	70,19
PCS ($\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$ ps)	3550	3422

Quadro 5.5 – Composição Elementar dos Substratos 2 e 3.

Composição Elementar	Substrato	
	2	3
C (%ps bcc)	40,47	32,34
H (%ps bcc)	5,52	3,96
O (%ps bcc)	52,40	61,95
N (%ps bcc)	1,62	1,76

Quadro 5.6 – Razão C/N dos Substratos 2 e 3.

Substrato	Razão C/N
2	29
3	21

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Através da comparação dos resultados obtidos para as amostras dos substratos 2 e 3 e das respectivas lamas, é possível verificar que as características físico-químicas são ligeiramente afectadas pela adição de casca de arroz.

Seria de esperar uma maior redução no teor de humidade da Lama 2, uma vez que a percentagem de casca adicionada foi 5%, que foi ligeiramente superior à percentagem de casca adicionada à Lama 3 (cerca de 4%), este valor poderá dever-se a um erro na análise ou manuseamento da amostra. No entanto a humidade da Pilha 2, decresceu cerca de 4%. Segundo Zhang, Y. e He, Y., (2006) e Mason, *et al.* (2004), a adição de estruturante, pode não só redistribuir a humidade na pilha como também reduzir os teores em humidade na mesma, será de esperar que quanto maior a adição de estruturante maior será essa redução.

Outro parâmetro relevante que alterou significativamente foi a percentagem de sólidos voláteis. Nas determinações que se referem às Pilhas 2 e 3, observou-se um aumento de 2,6 e 3,5% ps, respectivamente em teor de sólidos voláteis após a adição de casca de arroz.

Os valores de PCS foram também afectados uma vez que se observou uma percentagem de aumento de 2,59 e 2,23% em relação valor inicial, o que representa um aumento de 92 e 76,32 cal.g⁻¹ ps, respectivamente.

Comparando os valores obtidos na análise da composição elementar dos substratos 2 e 3 verifica-se um aumento significativo da percentagem de C de 3,31% no substrato 2, no entanto o aumento foi quase insignificante no substrato 3, 0,2%. Apesar das diferenças no aumento da percentagem de C, verificou-se uma diminuição semelhante no teor de N. O teor de N diminuiu nos substratos 2 e 3, 0,49 e 0,40%, respectivamente.

Segundo os valores de C/N referidos pelos autores Choi (2007), Venglosky *et al.* (2005) e Haug (1993), os substratos 2 e 3 apresentam razões C/N um pouco baixas, mas aceitáveis para o bom decorrer do processo de compostagem. Segundo Tchobanoglous (1993), consideram-se valores de razão C/N como aceitáveis para o bom decorrer do processo de compostagem, a partir de 20.

5.3. Necessidades de arejamento

5.3.1. Ar requerido para satisfazer a necessidade estequiométrica de ar

Recorreu-se à equação geral de compostagem, considerando a degradabilidade do substrato inicial, para determinar a necessidade de ar para satisfazer a estequiometria dos substratos de compostagem.

Nos Quadros 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentadas as reacções estequiométricas que representam a evolução e degradabilidade dos substratos 1, 2 e 3 ao longo do processo (determinados através da Equação 4.7, com base nos Quadros do Anexo III).

Quadro 5.7 – Equações estequiométricas das reacções ao longo do processo de compostagem para o Substrato 1.

Dias	Equação da Reacção
	Substrato 1
0 - 17	$C_{28}H_{54}O_{20}N_1 + 8,143O_2 \rightarrow 0,846C_{24}H_{56}O_{21}N_1 + 7,904CO_2 + 2,731H_2O + 0,154NH_3$
17 - 45	$C_{24}H_{56}O_{21}N_1 + 15,130O_2 \rightarrow 0,918C_{14}H_{30}O_{15}N_1 + 11,697CO_2 + 14,372H_2O + 0,082NH_3$
45 - 80	$C_{14}H_{30}O_{15}N_1 + 2,436O_2 \rightarrow 0,889C_{13}H_{28}O_{14}N_1 + 2,331CO_2 + 2,416H_2O + 0,111NH_3$
80 - 104	$C_{13}H_{28}O_{14}N_1 + 3,503O_2 \rightarrow 0,997C_{10}H_{17}O_{10}N_1 + 2,828CO_2 + 5,323H_2O + 0,003NH_3$

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Quadro 5.8 – Equações estequiométricas das reacções ao longo do processo de compostagem para o Substrato 2.

Dias	Equação da Reacção
	Substrato 2
0 - 2	$C_{29}H_{47}O_{28}N_1 + 3,895O_2 \rightarrow 0,998C_{26}H_{43}O_{28}N_1 + 3,125CO_2 + 2,298H_2O + 0,002NH_3$
2 - 6	$C_{26}H_{43}O_{28}N_1 + 3,497O_2 \rightarrow 0,999C_{23}H_{39}O_{26}N_1 + 3,479CO_2 + 1,940H_2O + -0,001NH_3$
6 - 8	$C_{23}H_{39}O_{26}N_1 + 0,630O_2 \rightarrow 0,984C_{22}H_{38}O_{25}N_1 + 0,756CO_2 + 0,787H_2O + 0,016NH_3$
8 - 13	$C_{22}H_{38}O_{25}N_1 + 5,766O_2 \rightarrow 0,983C_{18}H_{26}O_{21}N_1 + 4,875CO_2 + 6,263H_2O + 0,017NH_3$
13 - 20	$C_{18}H_{26}O_{21}N_1 + 2,767O_2 \rightarrow 0,979C_{15}H_{22}O_{19}N_1 + 3,099CO_2 + 1,887H_2O + 0,021NH_3$
20 - 27	$C_{15}H_{22}O_{19}N_1 + 0,394O_2 \rightarrow 0,999C_{14}H_{22}O_{18}N_1 + 0,638CO_2 + 0,195H_2O + 0,001NH_3$
27 - 34	$C_{14}H_{22}O_{18}N_1 + 0,606O_2 \rightarrow 0,980C_{14}H_{22}O_{18}N_1 + 0,487CO_2 + 0,383H_2O + 0,020NH_3$
34 - 49	$C_{14}H_{21}O_{18}N_1 + 1,026O_2 \rightarrow 0,998C_{13}H_{21}O_{17}N_1 + 1,444CO_2 + 0,386H_2O + 0,002NH_3$

Quadro 5.9 – Equações estequiométricas das reacções ao longo do processo de compostagem para o Substrato 3.

Dias	Equação da Reacção
	Substrato 3
0 - 2	$C_{21}H_{31}O_{31}N_1 + 3,101O_2 \rightarrow 0,998C_{19}H_{28}O_{30}N_1 + 2,870CO_2 + 1,666H_2O + 0,002NH_3$
2 - 6	$C_{19}H_{28}O_{30}N_1 + 2,923O_2 \rightarrow 0,997C_{16}H_{25}O_{28}N_1 + 2,431CO_2 + 1,582H_2O + 0,003NH_3$
6 - 8	$C_{16}H_{25}O_{29}N_1 + 1,377O_2 \rightarrow 0,975C_{15}H_{22}O_{27}N_1 + 1,849CO_2 + 1,650H_2O + 0,025NH_3$
8 - 13	$C_{15}H_{22}O_{27}N_1 + 1,586O_2 \rightarrow 0,966C_{14}H_{20}O_{27}N_1 + 1,469CO_2 + 1,273H_2O + 0,034NH_3$
13 - 20	$C_{14}H_{20}O_{27}N_1 + 1,012O_2 \rightarrow 0,975C_{13}H_{19}O_{26}N_1 + 1,246CO_2 + 0,890H_2O + 0,025NH_3$
20 - 27	$C_{13}H_{19}O_{26}N_1 + 0,632O_2 \rightarrow 0,907C_{12}H_{18}O_{25}N_1 + 1,782CO_2 + 1,138H_2O + 0,093NH_3$
27 - 34	$C_{12}H_{18}O_{25}N_1 + 1,442O_2 \rightarrow 0,928C_{11}H_{17}O_{26}N_1 + 1,792CO_2 + 1,002H_2O + 0,072NH_3$
34 - 49	$C_{11}H_{17}O_{26}N_1 + 0,375O_2 \rightarrow 0,972C_{11}H_{16}O_{24}N_1 + 0,954CO_2 + 0,564H_2O + 0,028NH_3$
49 - 75	$C_{11}H_{16}O_{24}N_1 + 0,533O_2 \rightarrow 0,864C_{10}H_{16}O_{24}N_1 + 1,904CO_2 + 0,946H_2O + 0,136NH_3$

Analisando as equações estequiométricas da reacção dos três substratos 1, 2 e 3, ao longo do processo, é possível verificar a evolução da decomposição dos mesmos.

A partir das equações das reacções de compostagem obtidas para os vários dias do processo foi possível determinar-se o consumo de O_2 .

Tornou-se então possível determinar o ar requerido para satisfazer a necessidade estequiométrica, ar_e (determinado através da Equação 4.12, com base nos Anexos III e IV).

Na Figura 5.1 são apresentados os resultados da determinação das do $ar_{e,acumulado}$ (determinado através da Equação 4.13, com base nos Anexos III e IV) para as Pilha 1, 2 e 3.

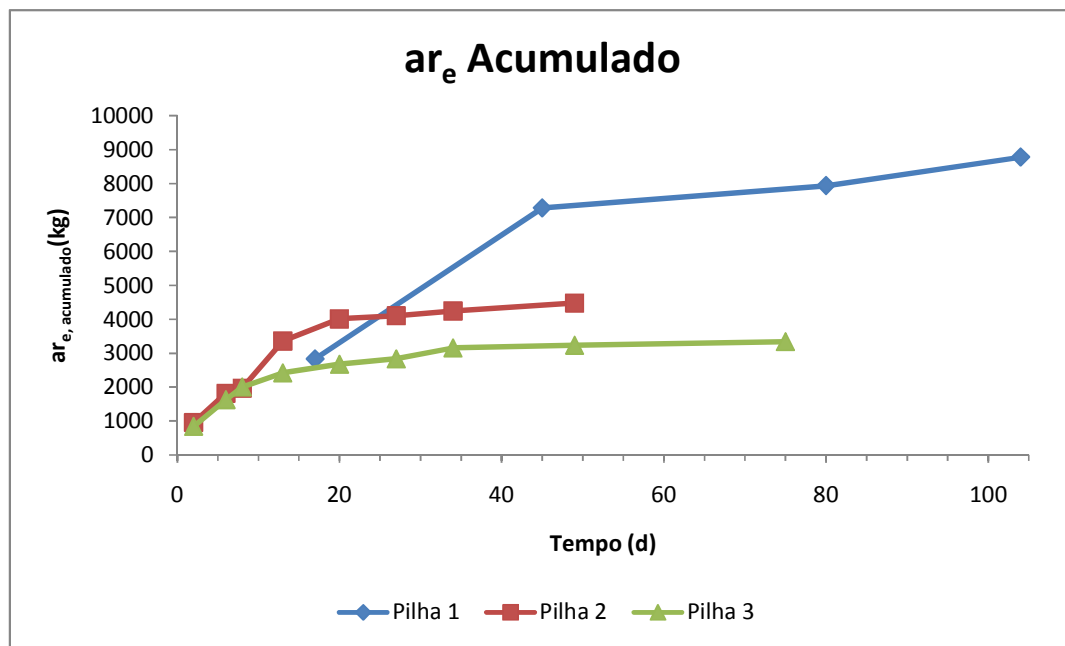


Figura 5.1 – ar_e acumulado, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Analisando os resultados obtidos de ar_e acumulado na Pilha 1 verifica-se que este é superior aos valores obtidos nas Pilha 2 e 3.

Pela análise dos resultados obtidos para as Pilhas 2 e 3 verifica-se que o ar consumido para satisfazer a necessidade estequiométrica foi superior na Pilha 2 em relação à Pilha 3.

Uma vez que a Pilha 1 se desenvolveu num período de tempo bastante superior conclui-se que esta necessidade de ar mais elevada se deve à ausência de estruturante, na pilha em questão.

Por outro lado o processo de compostagem da Pilha 2 foi mais rápido do que o da Pilha 3 o que justifica a maior necessidade de ar_e ao longo do tempo.

5.3.2. Ar necessário para reduzir a humidade

A partir da determinação da quantidade do ar necessário para reduzir a humidade, ar_h (determinado através da Equação 4.15, com base nos Anexos IV e V), nas Pilhas 1, 2 e 3, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.2 que se referem ao $ar_{h,acumulado}$ (determinado através da Equação 4.22, com base nos Anexos IV e V).

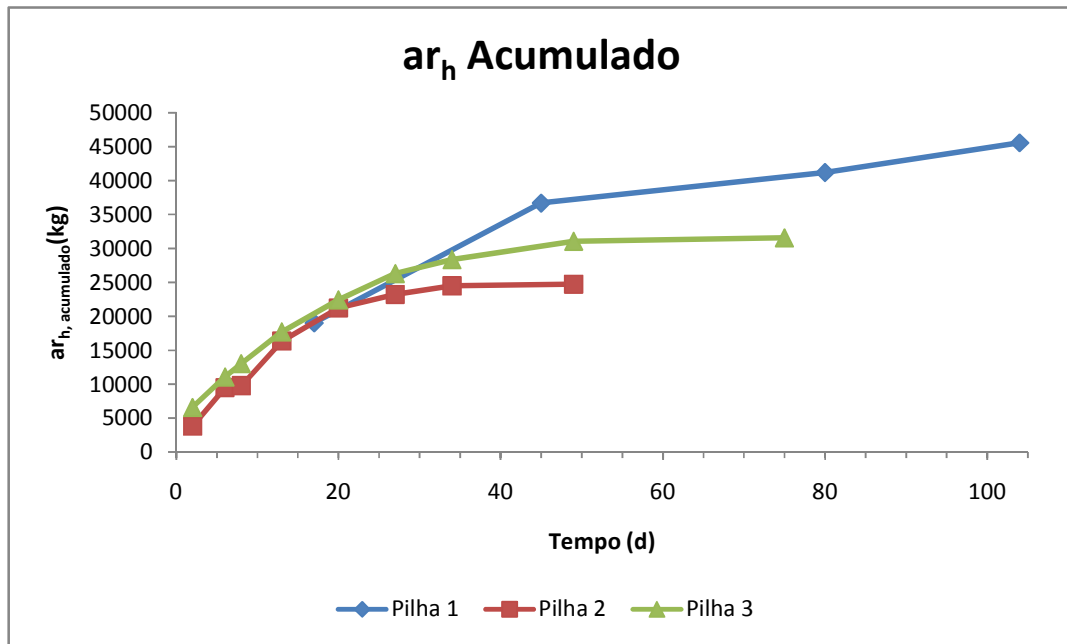


Figura 5.2 – ar_h acumulado, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Pela análise da Figura 5.2 verifica-se as necessidades de ar para reduzir a humidade nas Pilhas 1, 2 e 3, no decorrer do processo são bastante superiores às necessidades de ar para satisfazer a estequiometria.

Analisando os valores obtidos de ar_h acumulado para a Pilha 1 verifica-se, mais uma vez que este é superior aos valores obtidos nas Pilha 2 e 3. No entanto deve ter-se em conta que a redução de humidade da Pilha 1 foi muito inferior do que nas Pilhas 2 e 3, com base nos valores que são apresentados na Figura 5.7. Assim, para uma menor redução de humidade

foi necessária maior quantidade de ar, o que pode ser justificado pela adição de casca nas Pilhas 2 e 3.

Analisando os valores de ar_h acumulado obtidos para as Pilhas 2 e 3 verifica-se que o ar necessário à remoção de humidade foi superior na Pilha 3. No entanto as diferenças verificadas devem-se à maior redução de humidade observada na Pilha 3 (Figura 5.7).

5.3.3. Ar necessário para o controlo da temperatura

Através da determinação da quantidade do ar necessário para controlar a temperatura, ar_t (determinado através da Equação 4.24, com base nos Anexos III e IV), nas Pilha 1, 2 e 3, foi possível obter os resultados apresentados na Figura 5.3, que se referem ao $ar_{t,acumulado}$ (determinado através da Equação 4.32, com base nos Anexos III e IV).

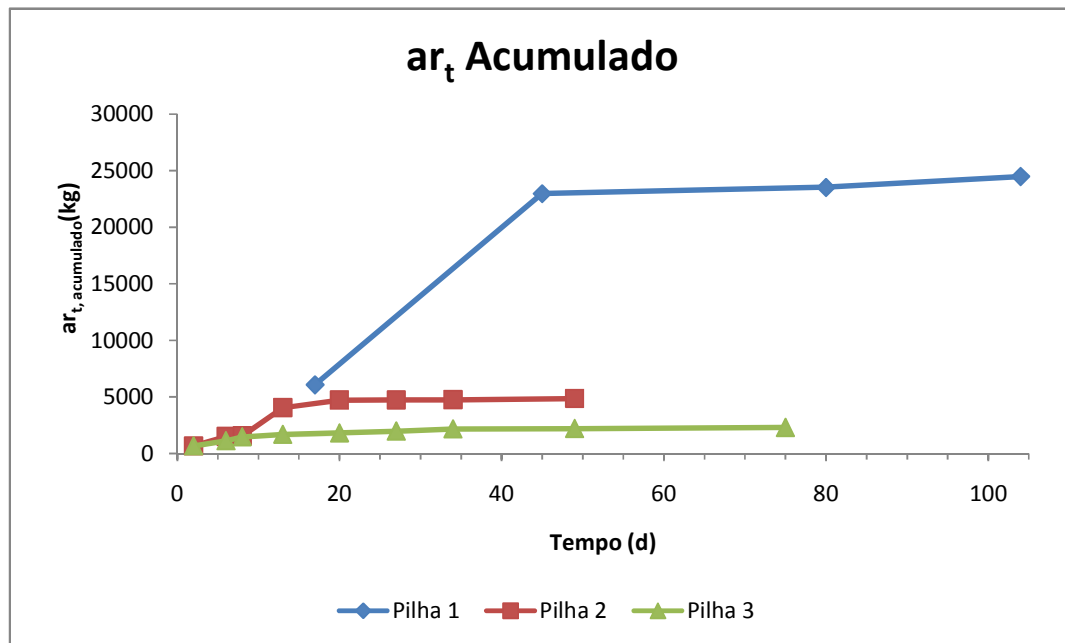


Figura 5.3 – ar_t acumulado, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Analisando a Figura 5.3, verifica-se que as necessidades de ar para controlar a temperatura nas Pilhas 2 e 3, no decorrer do processo são inferiores às necessidades de ar para satisfazer

a estequiometria e conseqüentemente inferiores às necessidades de ar para reduzir a humidade.

Na Pilha 1 observa-se que apesar das necessidades de ar para controlar a temperatura serem inferiores, às necessidades de ar para reduzir a humidade, são superiores às necessidades de ar para satisfazer a estequiometria.

5.3.4. Taxas de arejamento

Sabendo a quantidade do ar necessário para satisfazer as necessidades estequiométricas, para a redução da humidade e para o controlo da temperatura foi possível determinar as respectivas taxas de arejamento médias para cada momento, $TA_{médE}$, $TA_{médH}$ e $TA_{médT}$ (determinadas através da Equação 4.34, com base nos Anexos III, IV e V).

Na análise das necessidades de ar observa-se que a necessidade de ar para a redução da humidade se sobrepõe às outras necessidades, observando as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 verifica-se o mesmo.

Nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 são apresentadas graficamente as $TA_{médE}$, $TA_{médH}$ e $TA_{médT}$, para as Pilhas 1, 2 e 3, respectivamente.

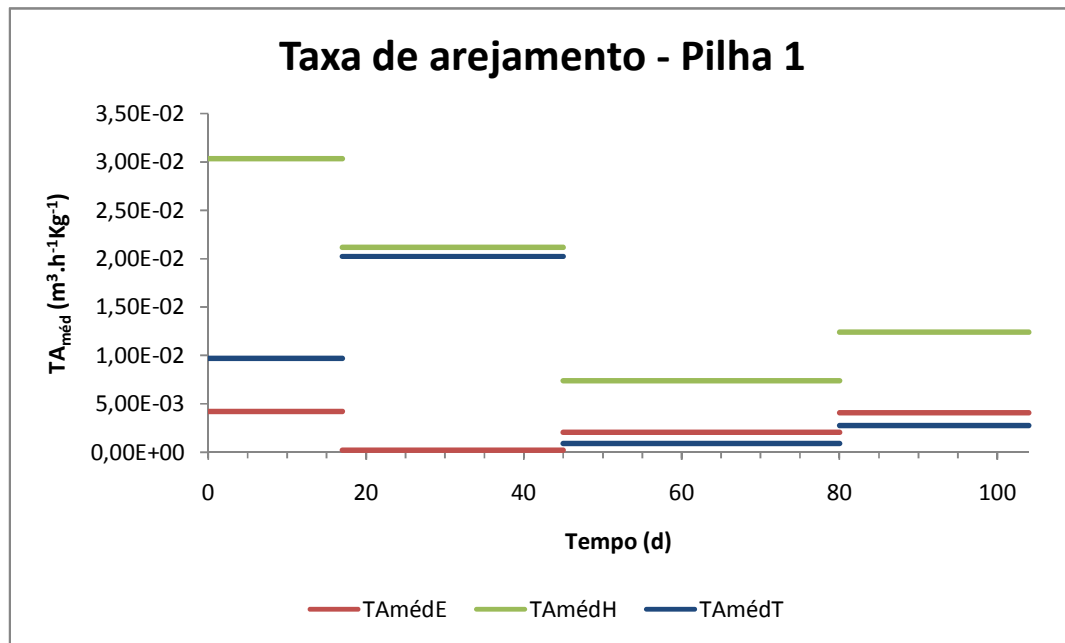


Figura 5.4 – Taxas de arejamento médias, para a Pilha 1.

Analisando os resultados obtidos de $TA_{médE}$ para a Pilha 1 verifica-se que esta é superior no início do processo.

Pela análise dos valores obtidos de $TA_{médH}$ verifica-se que o pico de arejamento corresponde aos primeiros 17 dias do processo. Os valores de $TA_{médH}$ diminuem ao longo do tempo.

Observando os resultados obtidos de $TA_{médT}$ verifica-se que esta acompanha os valores obtidos de $TA_{médE}$, é superior no início do processo. Havendo um pico de arejamento entre os dias 17 ao dia 45.

Uma vez que a $TA_{médH}$ se sobrepõe às outras taxas, considera-se que o pico de arejamento se encontra entre os dias 0 e 17.

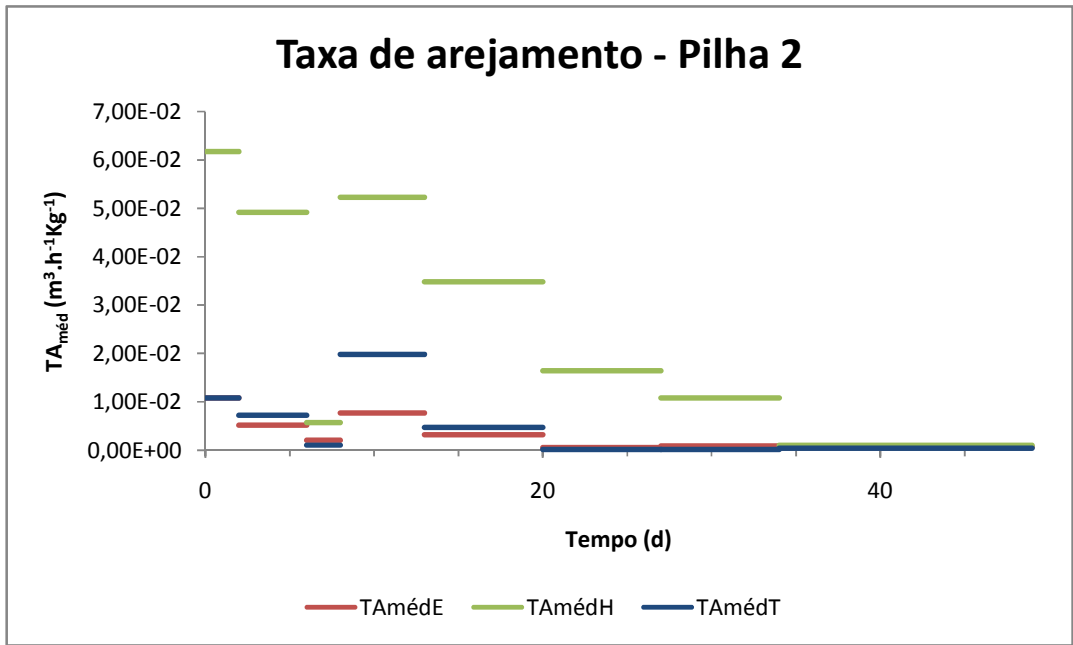


Figura 5.5 – Taxas de arejamento médias, para a Pilha 2.

Pela análise dos resultados obtidos para a Pilhas 2 verifica-se que os picos de arejamento para satisfazer a necessidade estequiométrica são semelhantes até ao dia 6, no entanto volta a haver o aumento da $TA_{médE}$ entre o dia 8 e 13.

Analisando os valores de $TA_{médH}$ obtidos verifica-se um pico de arejamento no início do processo (dias 0 a 2) e depois verifica-se outro pico entre os dias 8 a 13.

O primeiro pico de $TA_{médT}$ encontra-se entre os dias de 0 a 2. Depois entre os dias 6 e 8 verifica-se uma queda da $TA_{médT}$ e mais uma vez um pico entre os dias 8 a 13.

Assim observa-se que os picos de arejamento para a Pilha 2 são nos dias de 0 a 2 e nos dias de 8 a 13 do processo. Sendo a $TA_{médH}$ a taxa que sobrepõe às outras.

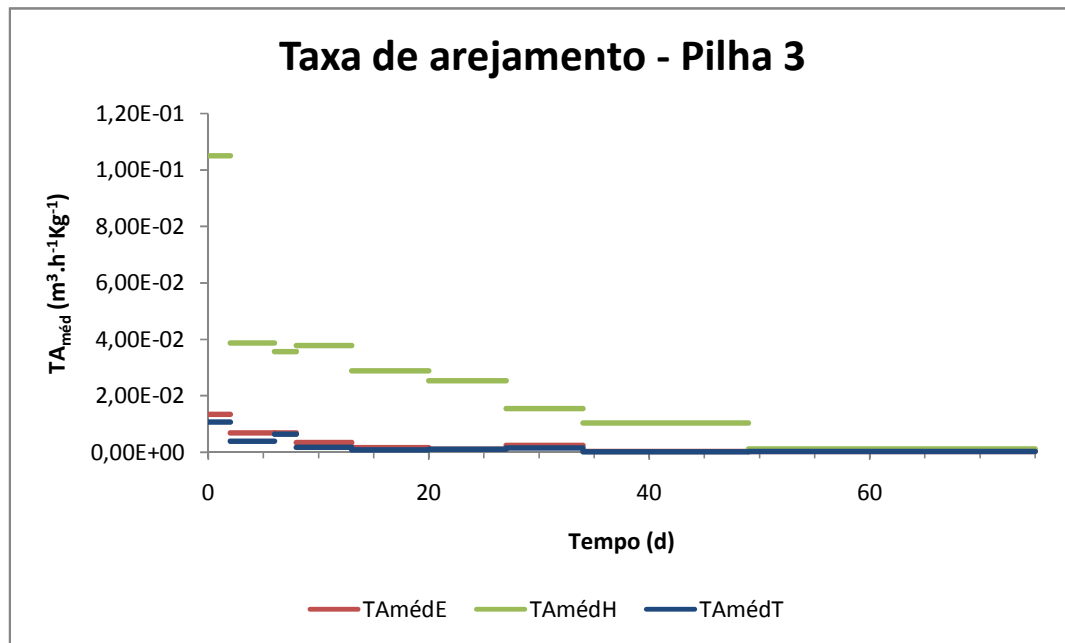


Figura 5.6 – Taxas de arejamento médias, para a Pilha 3.

Pela análise dos resultados obtidos para a Pilha 3 verifica-se que o pico de arejamento para satisfazer a necessidade estequiométrica se encontra entre os dias 0 a 2.

Analisando os valores de $TA_{médH}$ verifica-se picos de arejamento no início do processo (dias 0 a 2) e depois verifica-se outra vez pico de $TA_{médH}$ nos dias 8 a 13.

O pico de arejamento das $TA_{médT}$ observa-se para os dias 0 a 2 e de modo geral vai decrescendo ao longo do processo. Havendo no entanto um pequeno pico de arejamento entre os dias 6 a 8.

Para a Pilha 3, a $TA_{médH}$ é a taxa que se sobrepõe às outras.

Analisando as Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 é possível verificar não só, que a necessidade de arejamento para a redução da humidade é superior às outras necessidades, mas também (como seria de esperar) que as pilhas não necessitam de um arejamento uniforme ao longo do tempo. De um modo geral as primeiras semanas de compostagem são as mais críticas.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Nas três pilhas os picos de arejamento verificam-se nos primeiros 15 dias de compostagem. É nessa altura que deverá ser estabelecido o caudal ar para satisfazer as necessidades do substrato, de redução de humidade e controlo da temperatura.

Através dos resultados obtidos verifica-se que é importante estabelecer estratégias para o dimensionamento do arejador. Ou seja, consoante a necessidade de ar que se queira adoptar como principal, a ter em conta em cada processo.

Se a estratégia de dimensionamento se fosse basear na necessidade estequiométrica deveria iniciar-se o processo com a introdução de um caudal médio de 4×10^{-3} , 11×10^{-3} e $13 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, nas Pilhas 1, 2 e 3, respectivamente.

Se o dimensionamento da pilha só depende-se da humidade, no caso das Pilha 1, 2 e 3, deveria iniciar-se o processo com a introdução de um caudal médio de 30×10^{-3} , 60×10^{-3} e $100 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$. A taxa de arejamento da Pilha 3 poderia ser reduzida para $40 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ depois dos primeiros 2 dias de compostagem.

Se a estratégia de dimensionamento tivesse como prioridade o controlo da temperatura, deveria iniciar-se o processo com a introdução de um caudal médio de 10×10^{-3} , 11×10^{-3} e $11 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, nas Pilhas 1, 2 e 3, respectivamente.

Passados os primeiros 15 dias e para qualquer uma das estratégias seria possível reduzir o caudal para metade, em todas as pilhas.

No entanto, será de esperar, que num substrato húmido com necessidades de remoção de humidade elevadas, se considere a estratégia de redução de humidade para o dimensionamento do arejador.

5.3.5. Humidade e Calor

Através da análise dos resultados das necessidades de arejamento percebeu-se que a necessidade de arejamento para a redução da humidade se sobrepõe às outras necessidades.

É importante verificar se a perda de água e de calor das pilhas, tem relação entre si. Ou seja, importa avaliar se o calor libertado na oxidação da matéria orgânica e o calor perdido pelo substrato foi utilizado para evaporar a humidade.

Na Figura 5.7 é apresentada a evolução da humidade ao longo do tempo, nas Pilhas 1, 2 e 3 (determinada através da Equação 4.1, com base no Anexo IV).

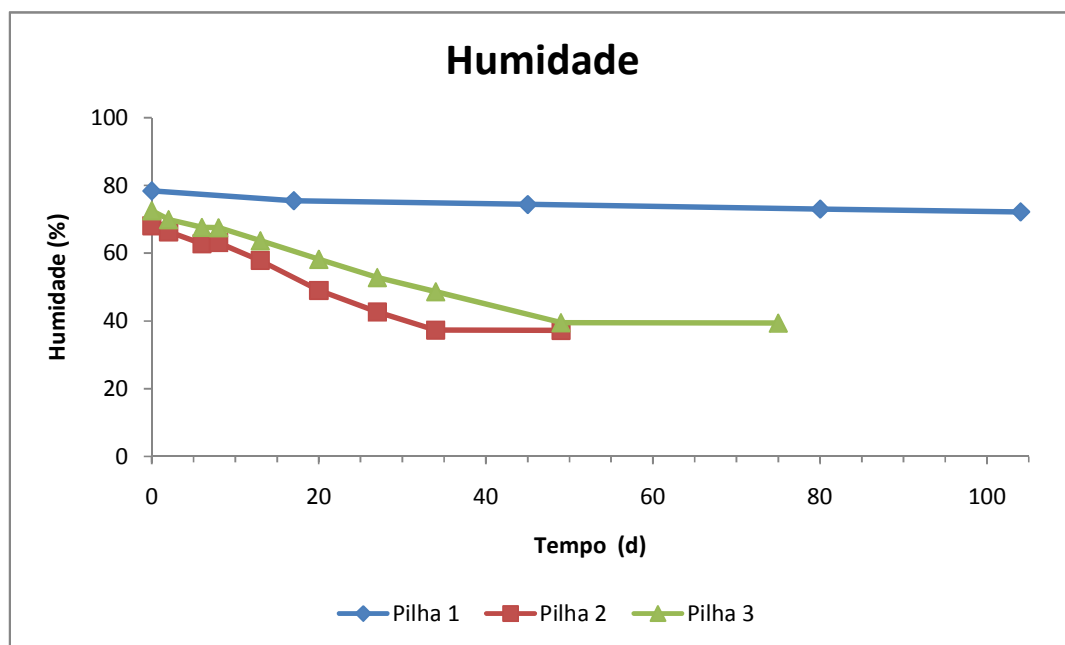


Figura 5.7 – Humidade ao longo do tempo de compostagem, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Analisando a Figura 5.7 verifica-se que existem grandes diferenças na redução de humidade entre as pilhas, o que seria de esperar considerando a adição de casca de arroz, às lamas 2 e 3.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 são apresentados os resultados obtidos do calor libertado na oxidação da matéria orgânica (E_i – determinado através da Equação 4.35, com base nos Anexos III e IV) e o calor perdido pelo substrato determinado através da determinação do PCS (Q_i – determinado através da Equação 4.41, com base no Anexo II), nas Pilhas 1, 2 e 3, respectivamente.

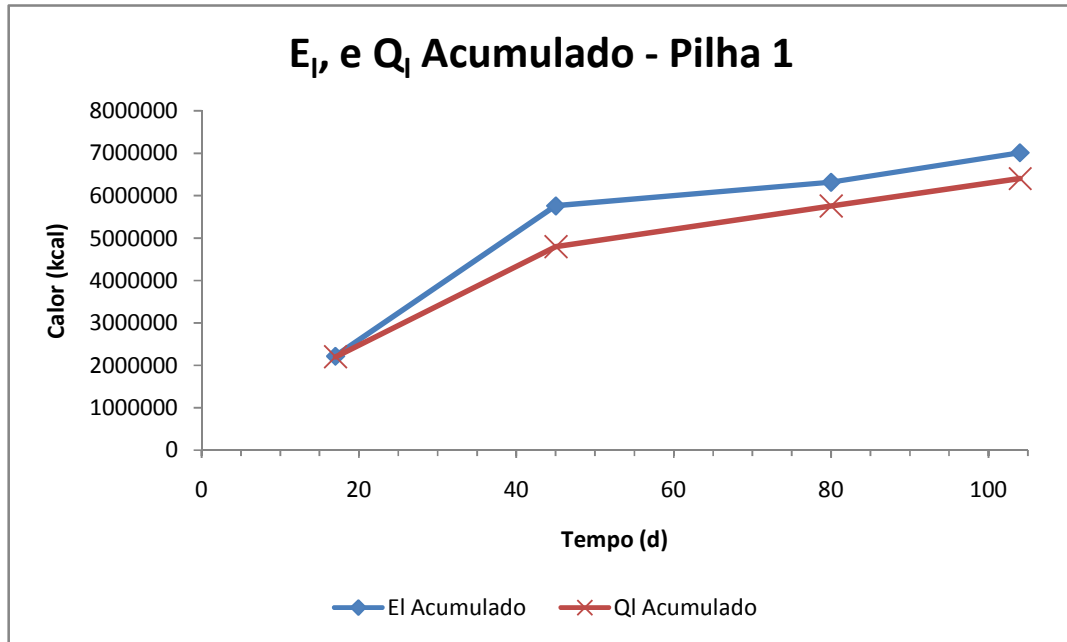
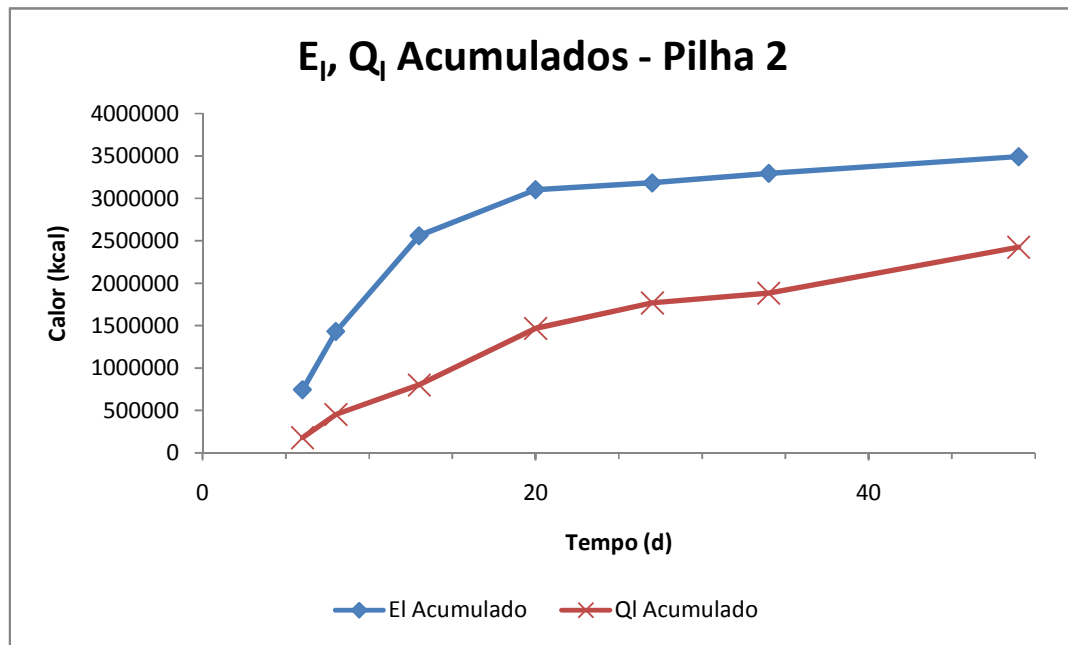
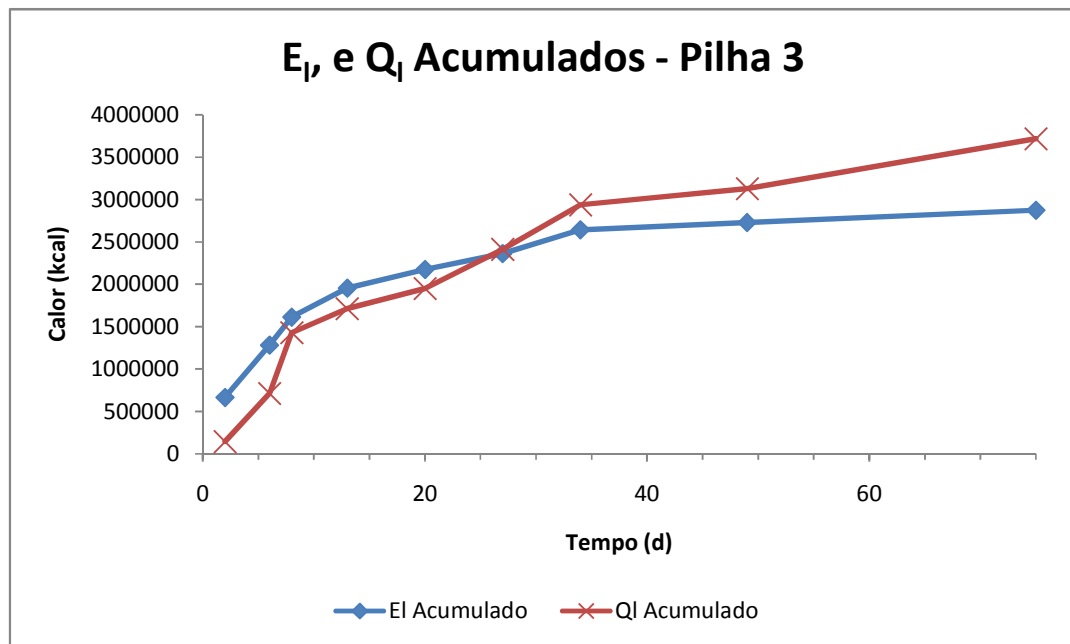


Figura 5.8 – E_i e Q_i Acumulado na Pilha 1.

Analisando a Figura 5.8, observa-se que os resultados de calor libertado determinados a partir dos valores obtidos de Q_i , apresentam um comportamento semelhante aos valores determinados a partir da equação do grau de redução da matéria orgânica, E_i , para a Pilha 1.

Figura 5.9 – E₁ e Q₁, Acumulado na Pilha 2.

Pela análise Figura 5.9, verifica-se, que no caso da Pilha 2 os resultados de Q₁, apresentam um comportamento semelhante aos valores E₁. No entanto, os valores obtidos para ambos os parâmetros diferem.

Figura 5.10 – E₁ e Q₁, Acumulado na Pilha 3.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

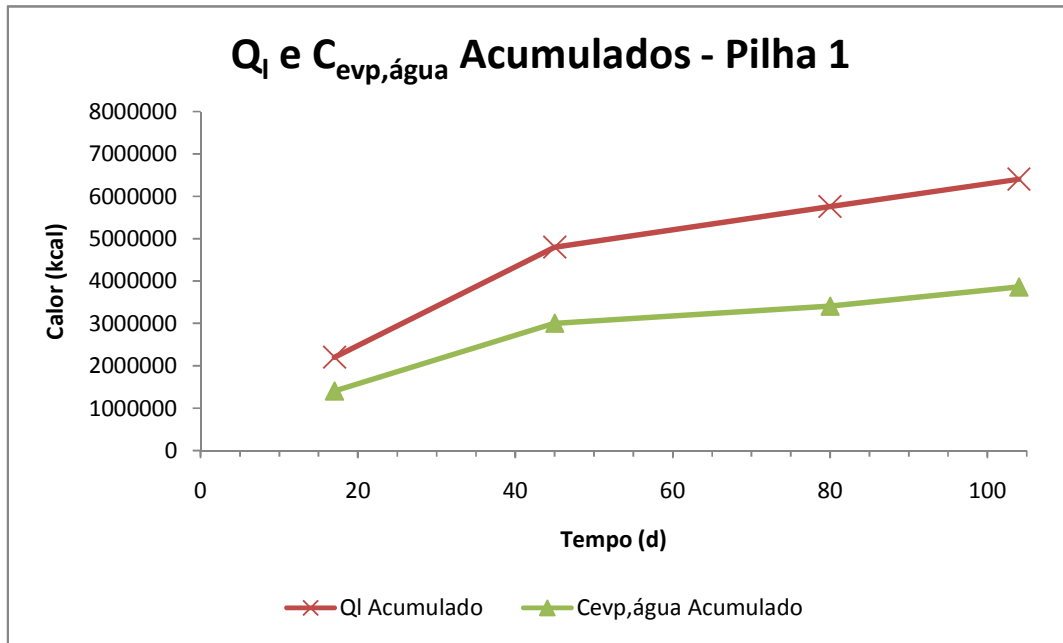
Por outro lado analisando os resultados obtidos para a Pilha 3 (Figura 5.10), verifica-se que à exceção do calor libertado até o dia 2 do processo, os valores apresentam o mesmo comportamento, não deixando de ser evidente que os valores divergem pouco.

As diferenças observadas, podem por um lado dever-se a erros nas análises ou pelo manuseamento do material.

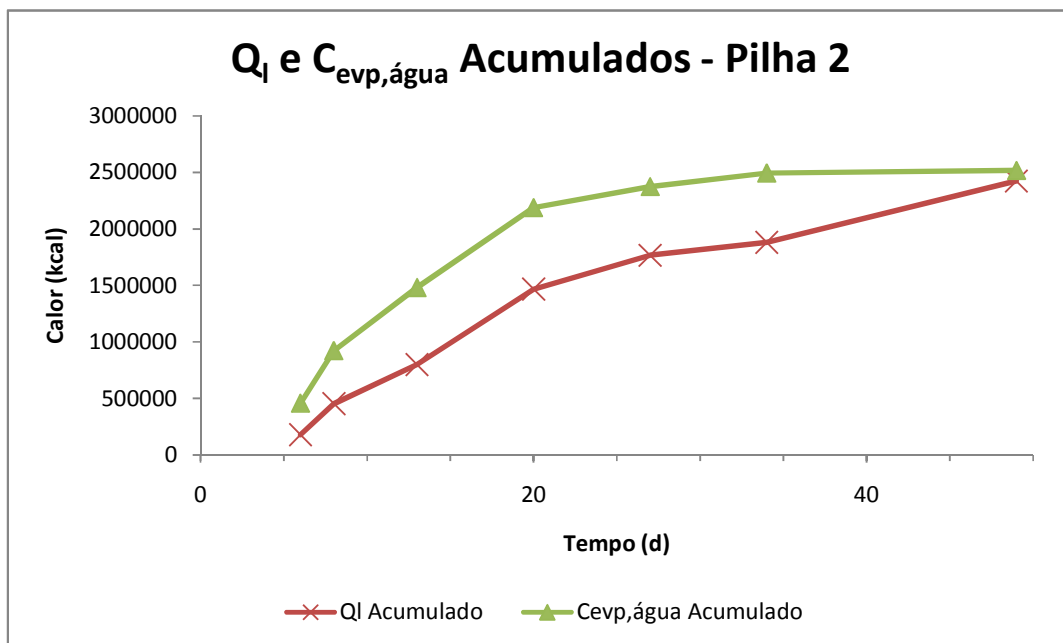
A equação referida por Haug (1993), é apenas um modelo geral para representar todo o tipo de matéria orgânica. Assim, optou-se por utilizar os valores de Q_i , que reflectem melhor o comportamento do substrato, uma vez que foram obtidos através das análises de PCS, do próprio substrato.

De seguida optou-se por utilizar os valores Q_i e compara-los com $C_{\text{evp,água}}$. Uma vez que deveria haver relação entre o calor libertado do substrato e o calor perdido por evaporação da água.

Nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 são apresentados os resultados do calor perdido pelo substrato determinado através da determinação do PCS (Q_i) e do calor utilizado na evaporação da água ($C_{\text{evp,água}}$ – determinado através da Equação 4.43, com base no Anexo IV), nas Pilhas 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 5.11 – Q_l e C_{evp,água} Acumulado na Pilha 1.

Analisando os resultados obtidos de Q_l e C_{evp,água} da Pilha 1 poderia entender-se que grande parte do calor libertado durante a oxidação da matéria orgânica, teria sido utilizado na evaporação da água, o que seria de esperar no substrato com elevado teor de humidade, como é o caso de estudo.

Figura 5.12 – Q_l e C_{evp,água} Acumulado na Pilha 2.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Analisando os resultados obtidos de Q_l e $C_{evp,água}$ da Pilha 2 verifica-se que a evolução dos valores parece ser semelhante.

Entende-se que variação de valores pode estar ligada a erros de determinação.

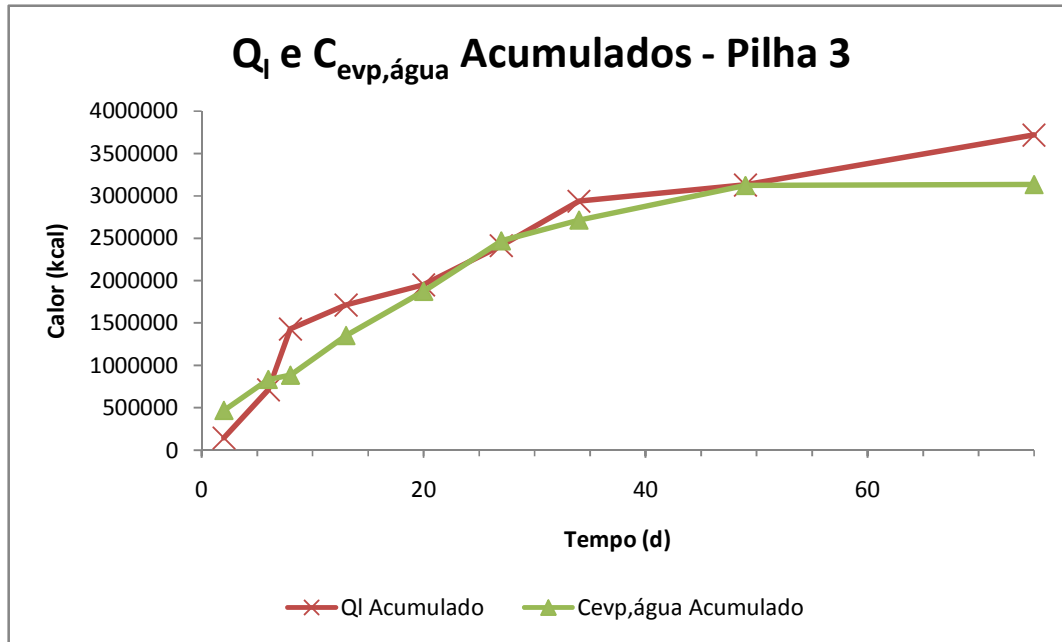


Figura 5.13 – Q_l e $C_{evp,água}$, Acumulado na Pilha 3.

Analisando os resultados obtidos de Q_l e $C_{evp,água}$ da Pilha 3 verifica-se que a evolução dos valores parece ser semelhante.

Mais uma vez, entende-se que variação de valores pode estar ligada a erros de determinação.

O calor libertado na evaporação (quando este é superior ao calor perdido do substrato), poderá corresponder a calor que ficou armazenado na pilha anteriormente (utilizado para subir a temperatura) e que depois é libertado.

No entanto seria de esperar que a libertação de calor através da evaporação da água tenha sido a principal fonte de perda de calor das pilhas, o que terá consequentemente afectado a baixa elevação da temperatura das pilhas.

5.3.6. Degradabilidade e Testes respirométricos

Para avaliação da degradabilidade e das taxas de reacção do processo foram efectuados testes respirométricos com base na produção de CO₂. Além de se ter verificado a degradabilidade dos substratos com base nos testes respirométricos, foi possível calcular a degradabilidade com base na perda de sólidos voláteis.

Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 são apresentados os resultados obtidos de degradação dos sólidos voláteis (em sólidos voláteis biodegradáveis acumulados – determinado através da Equação 4.29, com base no Anexo V).

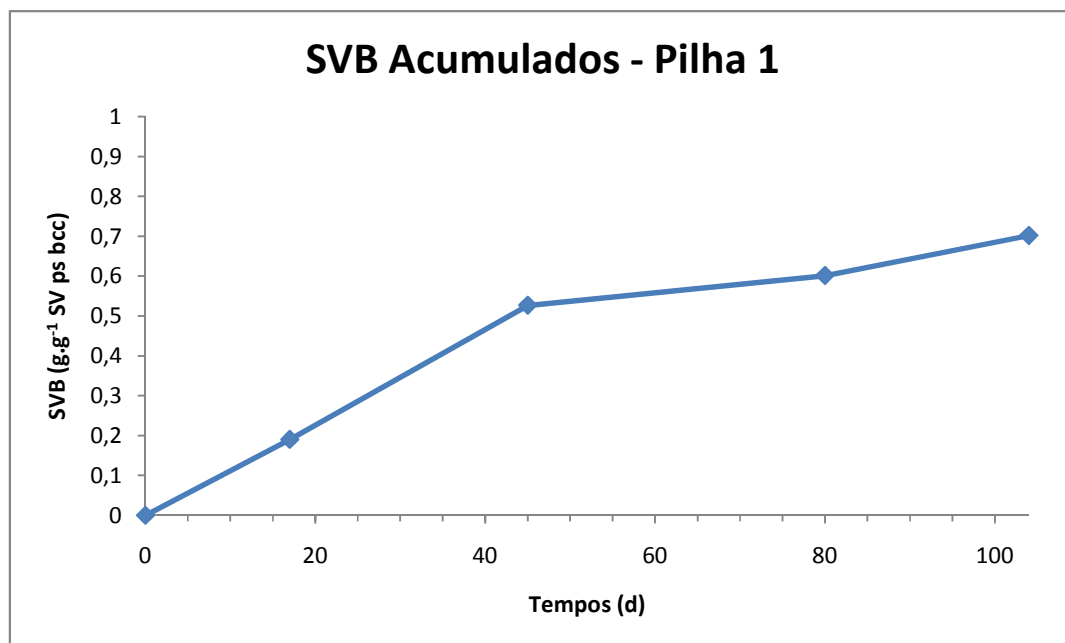


Figura 5.14 – Sólidos voláteis biodegradáveis acumulados, na Pilha 1.

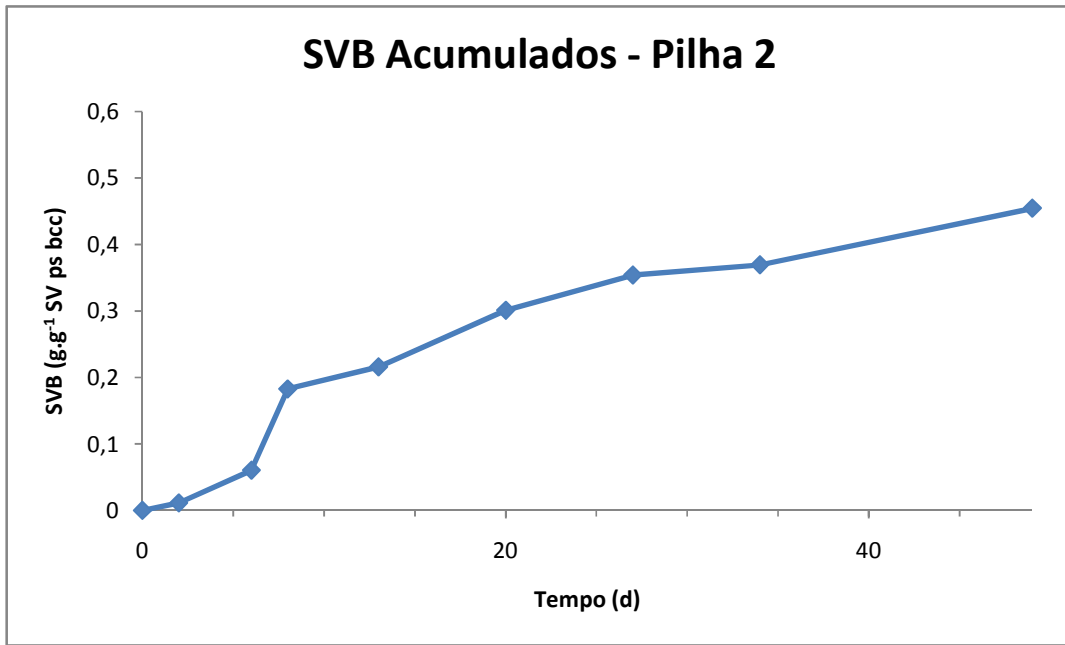


Figura 5.15 – Sólidos voláteis biodegradáveis acumulados, na Pilha 2.

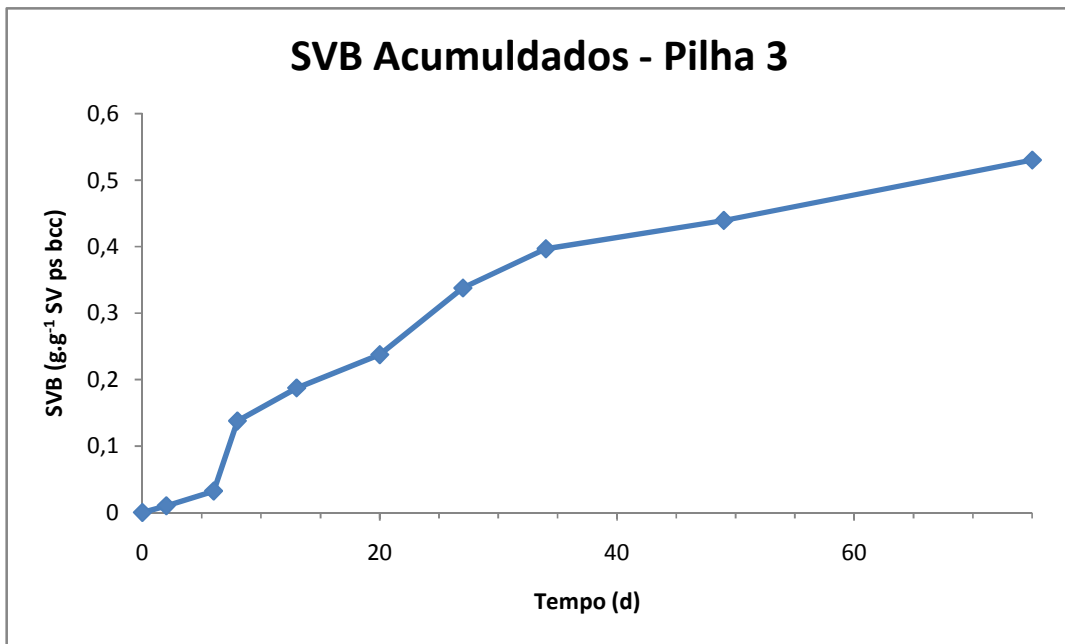


Figura 5.16 – Sólidos voláteis biodegradáveis acumulados, na Pilha 3.

Ao serem observados os gráficos das Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, é possível verificar que tanto na pilha 2 e 3 a percentagem de sólidos voláteis degradados é inferior à pilha 1. Ou seja, na pilha 1 a percentagem de sólidos voláteis degradáveis é de 70% enquanto nas pilhas 2 e 3 é

de 50%. Seriam de esperar estas variações uma vez que foi adicionada casca de arroz às pilhas 2 e 3 que pesa na fracção não degradável dos sólidos voláteis.

O ajuste matemático do modelo cinético de primeira ordem, permitiu estimar os parâmetros cinéticos, k (velocidade de degradação) e SVB_0 (valor máximo de SV degradados). No Quadro 5.10 são apresentados os coeficientes de correlação, para as três pilhas. A utilização de modelos cinéticos para descrever a biodegradabilidade de diferentes substratos orgânicos e o conhecimento dos parâmetros cinéticos, permite concluir sobre as diferenças de biodegradabilidade dos diversos substratos. O conhecimento da cinética de biodegradação permite por outro lado actuar sobre os sistemas.

Quadro 5.10 – Parâmetros cinéticos de SVB, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Pilhas	k_{SVB} (d ⁻¹)	SVB_0 (gSVB.g ⁻¹ SV)	r^2
1	$1,60 \times 10^{-2}$	0,7939	0,8729
2	$9,50 \times 10^{-2}$	0,6034	0,8774
3	$7,90 \times 10^{-2}$	0,6415	0,9486

Os resultados obtidos para os coeficientes de correlação, são elevados tendo em conta o r^2 , no entanto para se obter uma correlação verdadeiramente elevada deveria obter-se, nos resultados nas pilhas 1 e 2, r^2 iguais ou superiores a 0,975 (Spearman, referido por Chroni *et al.*, 2009), o que não acontece. No entanto, autores como Haroun *et al.* (2008), Mohee e Mudhoo (2005) e Breitenbeck e Schellinger (2004), consideram aceitáveis, coeficientes de correlação superiores a 0,920, 0,950 e 0,850, respectivamente.

Considerando que estes valores se referem a resultados experimentais que provavelmente apresentam erros associados, aceitam-se os valores obtidos de k , para as três pilhas.

O valor obtido de coeficiente de correlação para a pilha 3 é elevado o que indica que a degradabilidade desta pilha pode se bem descrita pela equação cinética adoptada. A

5. Apresentação e Discussão de Resultados

constante de velocidade de degradação de primeira ordem estimada (k), para as três pilhas foi respectivamente, $1,60 \times 10^{-2} \text{d}^{-1}$, $9,50 \times 10^{-2} \text{d}^{-1}$ e $7,90 \times 10^{-2} \text{d}^{-1}$.

Comparando os valores obtidos de k pode concluir-se que a Pilha 1 apresenta um valor inferior de constante de velocidade o que indica que foi a pilha que sofreu uma degradação mais lenta.

Comparando os valores obtidos para as Pilhas 2 e 3, verifica-se que o substrato da Pilha 2 degradou-se mais rapidamente do que o substrato da Pilha 3, o que se observou na prática.

Como foi referido no Capítulo 3, só foi possível efectuar ensaios de CO_2 no laboratório, para o início e fim de cada pilha e no caso particular da pilha 1, foram feitos ensaios de CO_2 também para três amostragens no decorrer do processo.

Na Figura 5.17 são apresentados os resultados obtidos de CO_2 acumulado determinados no reactor, na Pilha 1 (determinados através da Equação 4.46, com base no Anexo XII).

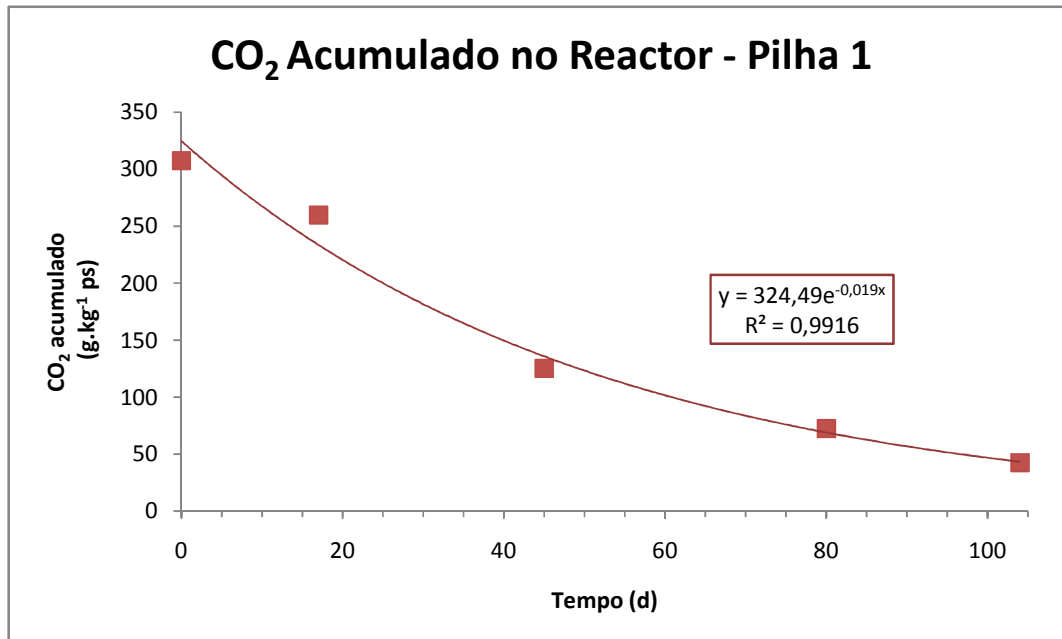


Figura 5.17 – CO_2 Acumulado no Reactor, Pilha 1.

Por observação da Figura 5.17 é possível verificar a evolução da libertação do CO₂ ao longo do tempo de compostagem, na Pilha 1. Considerando que a produção de CO₂ produzido nos testes respirométricos representa a degradabilidade do substrato verifica-se que entre os dias 17 e 45 foi onde se observou maior degradação. Comparando estes valores com os valores obtidos de TA_{méd}, observa-se que é nessa altura que se verificam o valor mais elevado de TA_{méd}T correspondente a 20m³.h⁻¹kg⁻¹ e nesse mesmo intervalo de tempo a TA_{méd}H decresce e apresenta o valor de 20m³.h⁻¹kg⁻¹. Os valores de TA_{méd}T e TA_{méd}H (e também TA_{méd}E) são determinados com base em parâmetros como percentagem de cada elemento, a redução de sólidos, a redução de humidade, entre outros. Ou seja os valores de CO₂ determinados nos reactores fornecem informação sobre a degradabilidade do substrato e apoiam as determinações efectuadas de TA_{méd}.

O ajuste matemático do modelo cinético de primeira ordem, permitiu estimar os parâmetros cinéticos k (constante de velocidade de degradação) e CO_{2,0} (valor máximo de CO₂ acumulado) que são apresentados no Quadro 5.11 os resultados obtidos, os coeficientes de correlação, para Pilha 1.

Quadro 5.11 – Parâmetros cinéticos de CO₂, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Pilha	k (h ⁻¹)	CO _{2,0} (gCO ₂ .kg ⁻¹ ps)	r ²
1	1,9x10 ⁻²	324,49	0,9916

O resultado obtido para o coeficiente de correlação, é bastante elevado (r² igual a 0,9916), assim conclui-se que existe uma boa correlação dos resultados.

Comparando os coeficientes de correlação obtidos a partir dos valores de SVB e CO₂ acumulado, 0,9667 e 0,9916, respectivamente, verifica-se que os resultados de CO₂ apresentam melhor correlação.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Nas Figuras 5.18 e 5.19 são apresentados os resultados obtidos de CO₂ acumulado determinados no reactor, nas Pilhas 2 e 3, respectivamente (determinados através da Equação 4.46, com base no Anexo XII). Uma vez que só foram efectuadas duas medições os resultados só permitem deduzir a estabilidade do substrato não podendo ser depois utilizados na avaliação das velocidades de degradação.

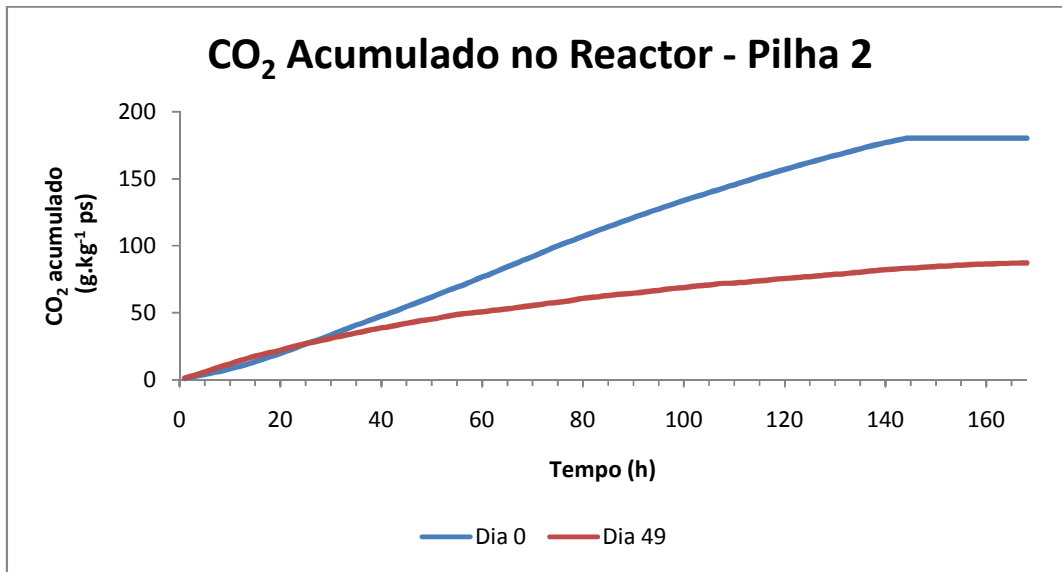


Figura 5.18 – Produção de CO₂ Acumulado no Reactor na Pilha 2.

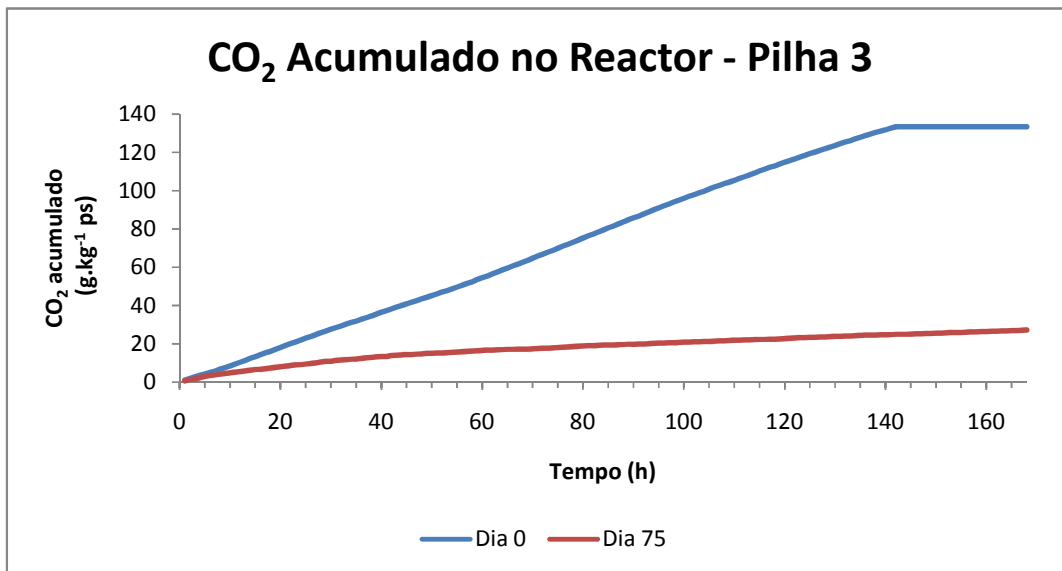


Figura 5.19 – Produção de CO₂ Acumulado no Reactor na Pilha 3.

Pela observação das Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 é possível observar que o substrato que liberta menor quantidade de CO₂ no final é o substrato da Pilha 3. Sendo o que apresenta maior valor de libertação de CO₂ no final do processo é o substrato da Pilha 2. Por outro lado, o substrato que apresenta maiores variações de libertação de CO₂ é o substrato da Pilha 1 e varia entre 307 e 43 g.kg⁻¹ substrato ps. No entanto, é preciso ter em conta que os tempos de compostagem das Pilha 1, 2 e 3, foram respectivamente 104, 49 e 75 dias e que o peso de substrato das Pilhas 2 e 3 consideram a casca contida na mistura.

5.3.7. Picos de arejamento

Para ser possível definir picos de arejamento é necessário efectuar a análise do processo de compostagem com base em todos os parâmetros determinados.

Procedeu-se à determinação dos valores de ar médio necessário à estequiometria, $ar_{e,méd}$, ar médio necessário para reduzir a humidade $ar_{h,méd}$, ar médio necessário para controlar a temperatura, $ar_{t,méd}$ dos valores médios de calor total libertado da pilha $Q_{l,méd}$ e dos valores médios de calor perdido na evaporação da água, $C_{evp,água,méd}$. Aplicando o modelo de cinética de primeira ordem é possível obter velocidades de degradação dos SVB, $v_{SVB,méd}$ e velocidade de degradação a partir dos valores de CO₂, $v_{CO_2,méd}$ (esta última apenas para a Pilha 1). Estes valores foram ainda comparados com os valores globais obtidos de $TA_{méd}E_{global}$, $TA_{méd}H_{global}$ e $TA_{méd}T_{global}$. Através da análise dos valores determinados é possível ter uma visão global dos diferentes processos.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

No Quadro 5.12, são apresentados os resultados globais obtidos para as três pilhas.

Quadro 5.12 – $ar_{e,méd}$, $ar_{h,méd}$, $ar_{t,méd}$, $Q_{l,méd}$, $C_{evp,água,méd}$, $v_{SVB,méd}$, $v_{CO2,méd}$, $TA_{médEglobal}$, $TA_{médHglobal}$ e $TA_{médTglobal}$, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Pilhas	$ar_{e,méd}$ (Kg ar.Kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	$ar_{h,méd}$ (Kg ar.Kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	ar_t (Kg ar.Kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	$Q_{l,méd}$ (Kcal.Kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	$C_{evp,água,méd}$ (Kcal.Kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	$v_{SVB,méd}$ (gSVB.g ⁻¹ SV.d ⁻¹)	$v_{CO2,méd}$ (gCO2.g ⁻¹ ps.h ⁻¹)	$TA_{médEglobal}$ (m ³ .h ⁻¹ .Kg ⁻¹)	$TA_{médHglobal}$ (m ³ .h ⁻¹ .Kg ⁻¹)	$TA_{médTglobal}$ (m ³ .h ⁻¹ .Kg ⁻¹)
1	0,065	0,338	0,174	201	115	0,0067	2,592	1,59X10 ⁻³	8,57X10 ⁻³	4,25X10 ⁻³
2	0,117	0,645	0,103	823	1097	0,0093	-	4,20X10 ⁻³	12,44X10 ⁻³	1,81X10 ⁻³
3	0,050	0,475	0,043	704	870	0,0071	-	0,99X10 ⁻³	12,77X10 ⁻³	0,84X10 ⁻³

Pela análise do Quadro 5.12 observa-se que a Pilha 1 em relação às Pilhas 2 e 3, apresentou valores globais inferiores de ar_h , Q_l , $C_{evp,água}$ e redução de SVB, para um período de compostagem muito superior ao das outras pilhas. Por outro lado para uma degradação da matéria orgânica mais lenta, necessitou de valores de ar total superiores (Figuras 5.1, 5.2, 5.3).

Assim, o efeito da adição de estruturante é visível nas diferenças dos resultados obtidos para as três pilhas.

Analisando os resultados obtidos de Q_l e $C_{evp,água}$ verifica-se que as Pilhas 2 e 3, que decorreram num período de tempo menor apresentaram maior perda de calor. Finstein *et al.* (1986) consideram que a perda de calor tem uma relação directa com as taxas de degradação da matéria orgânica. Comparando os valores globais obtidos para as três pilhas verifica-se que a Pilha 1 apresentou uma degradação inferior às Pilhas 2 e 3.

Entre as Pilhas 2 e 3, verifica-se que a primeira obteve valores de degradação sempre superiores aos da segunda. Estas diferenças justificam-se uma vez que a Pilha 2 sofreu uma degradação mais rápida do que a Pilha 3.

Os resultados que foram apresentados no Quadro 5.12 apresentam uma visão global do decorrer dos três processos.

É importante verificar os momentos críticos (picos de arejamento), para ser possível definir uma estratégia de arejamento. Assim, foram determinados os parâmetros apresentados no Quadro 5.12, para os diversos períodos analisados no processo. Os resultados são apresentados nos Quadros 5.13, 5.14 e 5.15 (determinados através das Equação 4.15, 4.23, 4.31, 4.33, 4.34, 4.42, 4.45 e 4.48, com base nos Anexos II, III, IV, V, IX, X, XI e XII), para as Pilhas 1, 2 e 3, respectivamente.

Quadro 5.13 – ar_e , ar_h , ar_t , Q_i , $C_{evp,água}$, v_{SVB} , v_{CO_2} , $TA_{médE}$, $TA_{médH}$ e $TA_{médT}$, na Pilha 1.

Dias	ar_e (kg ar.kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	ar_h (kg ar.kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	ar_t (kg ar.kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	Q_i (kal.kg ⁻¹ dg.d ⁻¹)	$C_{evp,água}$ (kcal.kg ⁻¹ deg.d ⁻¹)	v_{SVB} (gSVB.g ⁻¹ SV.d ⁻¹)	v_{CO_2} (gCO ₂ .g ⁻¹ ps.h ⁻¹)	$TA_{médE}$ (m ³ .h ⁻¹ kg ⁻¹)	$TA_{médH}$ (m ³ .h ⁻¹ kg ⁻¹)	$TA_{médT}$ (m ³ .h ⁻¹ kg ⁻¹)
0 - 17	0,475	3,187	1,019	369	235	0,006	2,813	4,23X10 ⁻³	30,31X10 ⁻³	9,70X10 ⁻³
17 - 45	0,256	1,018	0,973	150	92	0,003	4,806	0,21X10 ⁻³	21,16X10 ⁻³	20,22X10 ⁻³
45 - 80	0,137	0,940	0,115	199	85	0,010	1,509	2,04X10 ⁻³	7,39X10 ⁻³	0,90X10 ⁻³
80 - 104	0,186	0,967	0,214	146	102	0,008	1,242	4,05X10 ⁻³	12,39X10 ⁻³	2,75X10 ⁻³

Analisando os valores obtidos para a Pilha 1, verifica-se que de modo geral os valores são concordantes (apresentam-se a cor-de-laranja os valores discordantes).

Os principais valores discordantes são os de Q_i . Estes valores foram obtidos através das determinações de PCS.

Os picos de arejamento, na Pilha 1 são respeitantes aos primeiros 45 dias do processo. A $TA_{médH}$ foi a taxa de arejamento determinante para o processo.

A $TA_{médH}$ obtida para os primeiros 17 dias corresponde a $30X10^{-3} m^3 h^{-1} kg^{-1}$. Entre os dias 17 e 45 decresce para $21X10^{-3} m^3 h^{-1} kg^{-1}$.

Os picos de $TA_{médE}$, na Pilha 1 verificam-se para os valores mais elevados das velocidades de degradação.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Quadro 5.14 – ar_e , ar_h , ar_t , Q_i , $C_{evp,água}$, v_{SVB} , v_{CO2} , $TA_{médE}$, $TA_{médH}$ e $TA_{médT}$, na Pilha 2.

Dias	ar_e (kg ar. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	ar_h (kg ar. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	ar_t (kg ar. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	Q_i (kcal. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	$C_{evp,água}$ (kcal. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	v_{SVB} (gSVB. $g^{-1}SV.d^{-1}$)	$TA_{médE}$ ($m^3.h^{-1}kg^{-1}$)	$TA_{médH}$ ($m^3.h^{-1}kg^{-1}$)	$TA_{médT}$ ($m^3.h^{-1}kg^{-1}$)
0 - 2	4,941	19,610	3,429	4872	12460	0,043	$10,80 \times 10^{-3}$	$61,70 \times 10^{-3}$	$10,79 \times 10^{-3}$
2 - 6	1,583	10,474	1,535	872	1472	0,004	$5,16 \times 10^{-3}$	$49,14 \times 10^{-3}$	$7,20 \times 10^{-3}$
6 - 8	1,576	3,026	0,553	1830	80	0,026	$2,05 \times 10^{-3}$	$56,70 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$
8 - 13	1,111	5,255	1,993	1292	2093	0,017	$7,68 \times 10^{-3}$	$52,28 \times 10^{-3}$	$19,83 \times 10^{-3}$
13 - 20	0,663	4,965	0,672	697	737	0,005	$3,23 \times 10^{-3}$	$34,82 \times 10^{-3}$	$4,71 \times 10^{-3}$
20 - 27	0,408	8,847	0,094	501	312	0,017	$0,52 \times 10^{-3}$	$16,37 \times 10^{-3}$	$0,17 \times 10^{-3}$
27 - 34	1,285	11,509	0,144	664	689	0,007	$0,84 \times 10^{-3}$	$10,78 \times 10^{-3}$	$0,13 \times 10^{-3}$
34 - 49	0,250	0,260	0,111	264	11	0,001	$0,66 \times 10^{-3}$	$9,87 \times 10^{-3}$	$0,42 \times 10^{-3}$

Observando os valores obtidos para a Pilha 2 verifica-se que os resultados são bastante concordantes.

Os principais valores discordantes são os de Q_i e de v_{SVB} . Estes valores foram obtidos através das determinações de PCS e cinzas, respectivamente.

Os picos de arejamento, para a Pilha 2 verificam-se para os dias entre 0 e 2 e 8 e 13. A taxa de arejamento determinante para o processo foi a $TA_{médH}$.

Apesar da variação de valores considera-se que a taxa de arejamento dos primeiros 13 dias corresponde a $60 \times 10^{-3} m^3 h^{-1} kg^{-1}$ e que passados estes dias poderia ser reduzida para metade.

Quadro 5.15 – ar_e , ar_h , ar_t , Q_i , $C_{evp,água}$, v_{SVB} , v_{CO2} , $TA_{médE}$, $TA_{médH}$ e $TA_{médT}$, na Pilha 3.

Dias	ar_e (kg ar. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	ar_h (kg ar. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	ar_t (kg ar. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	Q_i (kcal. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	$C_{evp,água}$ (kcal. $kg^{-1}dg.d^{-1}$)	v_{SVB} (gSVB. $g^{-1}SV.d^{-1}$)	$TA_{médE}$ ($m^3.h^{-1}kg^{-1}$)	$TA_{médH}$ ($m^3.h^{-1}kg^{-1}$)	$TA_{médT}$ ($m^3.h^{-1}kg^{-1}$)
0 - 2	3,741	29,248	2,963	4472	14520	0,021	$13,44 \times 10^{-3}$	$105,05 \times 10^{-3}$	$10,64 \times 10^{-3}$
2 - 6	2,401	13,647	1,394	4015	2591	0,015	$6,81 \times 10^{-1}$	$38,69 \times 10^{-3}$	$3,95 \times 10^{-3}$
6 - 8	1,407	7,402	1,309	1683	1086	0,050	$6,78 \times 10^{-3}$	$35,65 \times 10^{-3}$	$6,30 \times 10^{-3}$
8 - 13	1,170	13,135	0,588	239	510	0,010	$3,37 \times 10^{-3}$	$37,84 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-3}$
13 - 20	0,513	9,391	0,259	430	940	0,007	$1,57 \times 10^{-3}$	$28,83 \times 10^{-3}$	$0,79 \times 10^{-3}$
20 - 27	0,155	3,851	0,158	832	1067	0,015	$1,02 \times 10^{-3}$	$25,35 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$
27 - 34	0,547	3,476	0,326	468	218	0,003	$2,43 \times 10^{-3}$	$15,46 \times 10^{-3}$	$1,45 \times 10^{-3}$
34 - 49	0,085	2,924	0,037	135	289	0,001	$0,30 \times 10^{-3}$	$10,34 \times 10^{-3}$	$0,13 \times 10^{-3}$
49 - 75	0,033	0,150	0,029	333	6	0,000	$0,26 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-3}$	$0,23 \times 10^{-3}$

Observando os resultados da Pilha 3, verifica-se que os resultados são concordantes.

Os principais valores discordantes são os de Q_i e de $C_{evp,água}$. Estes valores foram obtidos através das determinações de PCS e ST, respectivamente.

Os picos de arejamento, para a Pilha 3, encontram-se entre os dias 0 e 2. A taxa de arejamento determinante para o processo foi a $TA_{méd}H$.

Para satisfazer as necessidades de arejamento dever-se-ia introduzir na pilha, uma taxa de arejamento de $105 \times 10^{-3} h^{-1} kg^{-1}$, passados os primeiros 2 dias poder-se-ia reduzir para $40 m^3 h^{-1} kg^{-1}$ e passados os primeiros 15 dias do processo poder-se-ia reduzir para metade a taxa de arejamento.

Analisando os resultados obtidos para as três pilhas observa-se que a Pilha 1 apresentou uma cinética de degradação bastante mais lenta do que as outras duas pilhas, que pode ser verificada através da análise dos valores obtidos de v_{SVB} . Por outro lado, observando os valores os valores de ar_e , conclui-se que por cada kg de substrato degradado foi utilizada uma maior quantidade de ar. Ou seja, para uma degradação mais lenta foi consumida uma quantidade de ar superior, na Pilha 1.

Segundo Finstein *et al.* (1986) a perda de calor pode ser directamente relacionada com a degradação de matéria orgânica. Comparando os valores obtidos para as três pilhas conclui-se mais uma vez, que a Pilha 1 apresentou uma degradação bastante inferior às Pilhas 2 e 3. Os valores de Q_i obtidos para a Pilha 1 são muito inferiores aos obtidos para as outras duas pilhas. O mesmo se verifica para os valores de $C_{evp,água}$, uma vez que na Pilha 1 se observou uma redução de humidade bastante inferior (Figura 5.7).

Assim, observa-se que a casca apresenta um efeito relevante na degradação e necessidades de ar no substrato.

Nas pilhas 2 e 3 as diferenças que se verificam devem-se provavelmente às características dos substratos, que tiveram origem em diferentes suinicultores e assim, apresentaram degradabilidades diferentes. A Pilha 2 apresentou uma maior velocidade de degradação que a Pilha 3 e conseqüentemente que a Pilha 1.

À exceção dos valores de degradabilidade (em todo o processo) e dos valores de a_{rh} e $TA_{méd}H$ (no intervalo de tempo de 0 a 2 dias), verificou-se que as Pilhas 2 e 3 apresentaram valores semelhantes.

5.3.8. Caracterização genérica do processo

Através da análise dos dados obtidos para os parâmetros pH, condutividade, humidade, sólidos voláteis e razão C/N é possível fazer uma caracterização genérica do processo.

Nas Figuras 5.20, 5.21 e 5.22 são os apresentados os resultados obtidos de pH, condutividade, sólidos voláteis (valores médios obtidos com base nos Quadros dos Anexos II, V, VI e VII) e razão C/N (valores médios obtidos com base nos Quadros do Anexo III), nas três pilhas.

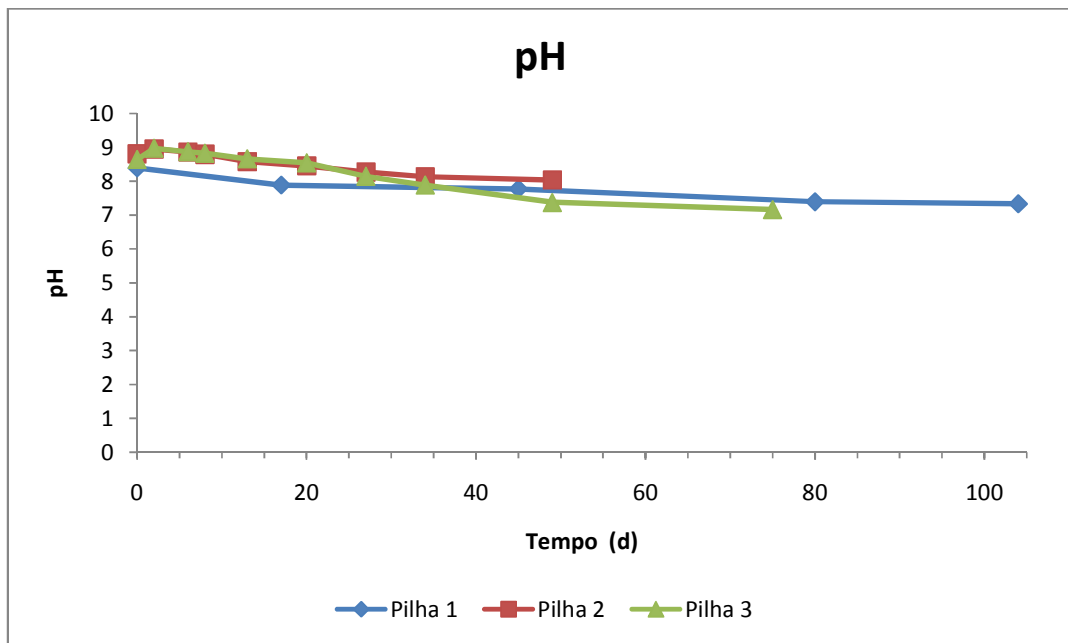


Figura 5.20 – pH, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Analisando a Figura 5.20 observa-se que as Pilhas 2 e 3 apresentam reduções aproximadas de pH, tendo sido a Pilha 2 a obter a redução mais alta de 8,81 a 7,32. A Pilha 1 verificou a redução mais baixa de 8,39 a 7,33.

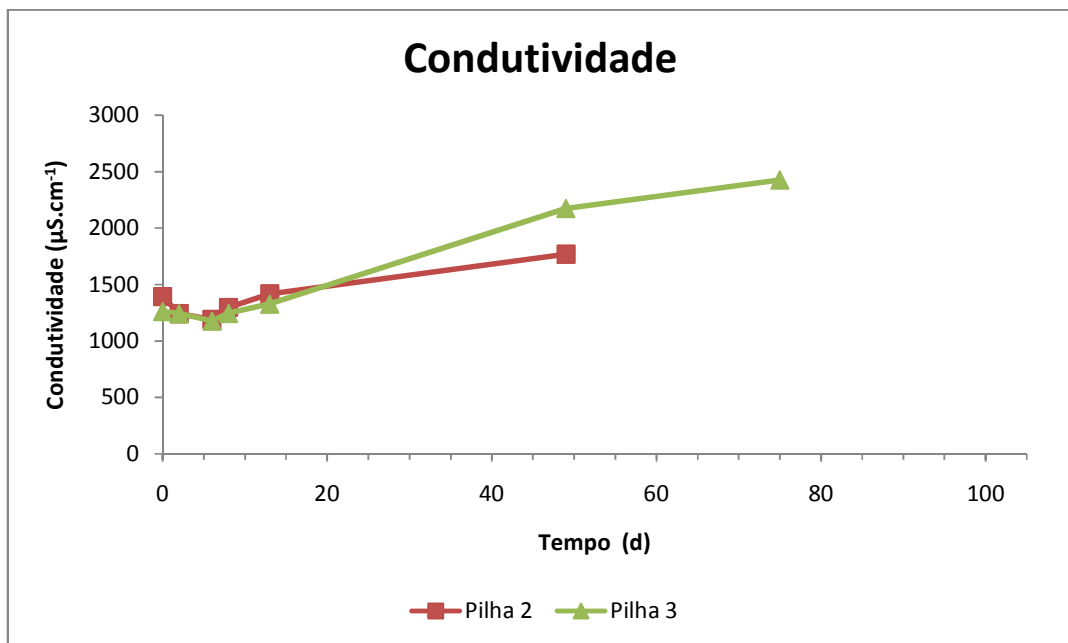


Figura 5.21 – Condutividade, nas Pilhas 2 e 3.

5. Apresentação e Discussão de Resultados

Verificou-se que as variações de condutividade nas Pilhas 2 e 3 também foram idênticas, tendo sido a Pilha 3 a apresentar o aumento mais elevado de 1260,50 a 2426,50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Observaram-se grandes diferenças na redução de humidade (Figura 5.7), o que seria de esperar considerando a adição de casca de arroz, às Pilhas 2 e 3, que não foi degradada no processo e mantém o mesmo peso e influência peso final da pilha. Enquanto a humidade da Pilha 1 teve uma redução apenas de 6,19%, nas Pilhas 2 e 3 verificou-se uma redução de 30,87% e 33,13%, respectivamente.

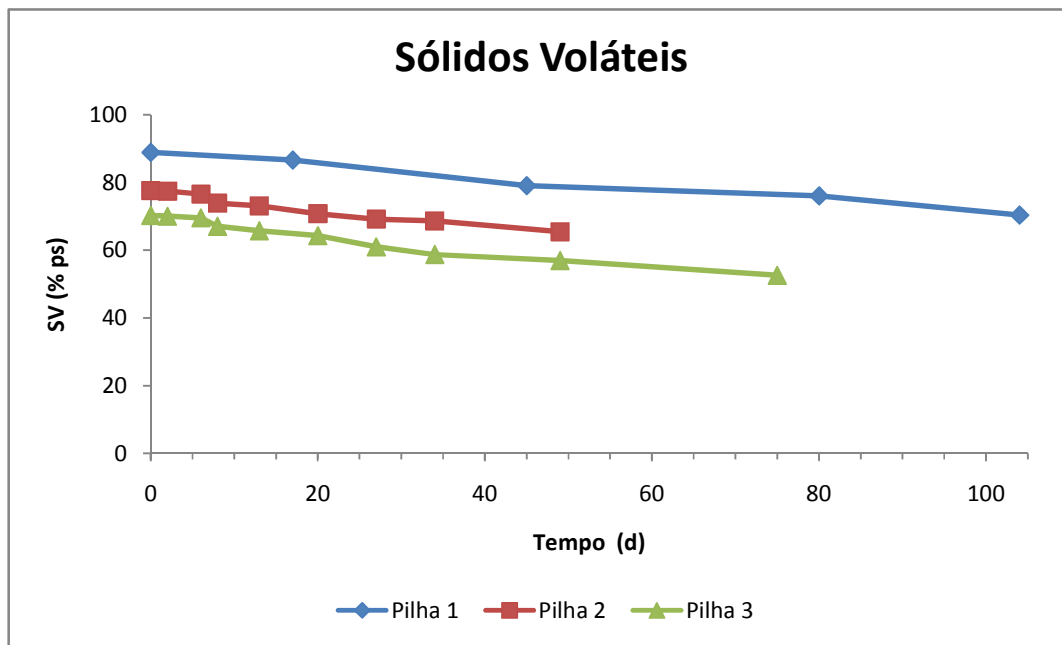


Figura 5.22 – Sólidos Voláteis, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Nos valores de redução de sólidos voláteis também foram observadas grandes diferenças. Na Pilha 1 observou-se apenas uma redução de 18,48% nos sólidos voláteis. Enquanto nas Pilhas 2 e 3, verificou-se a redução de 30,87 e 33,13% respectivamente.

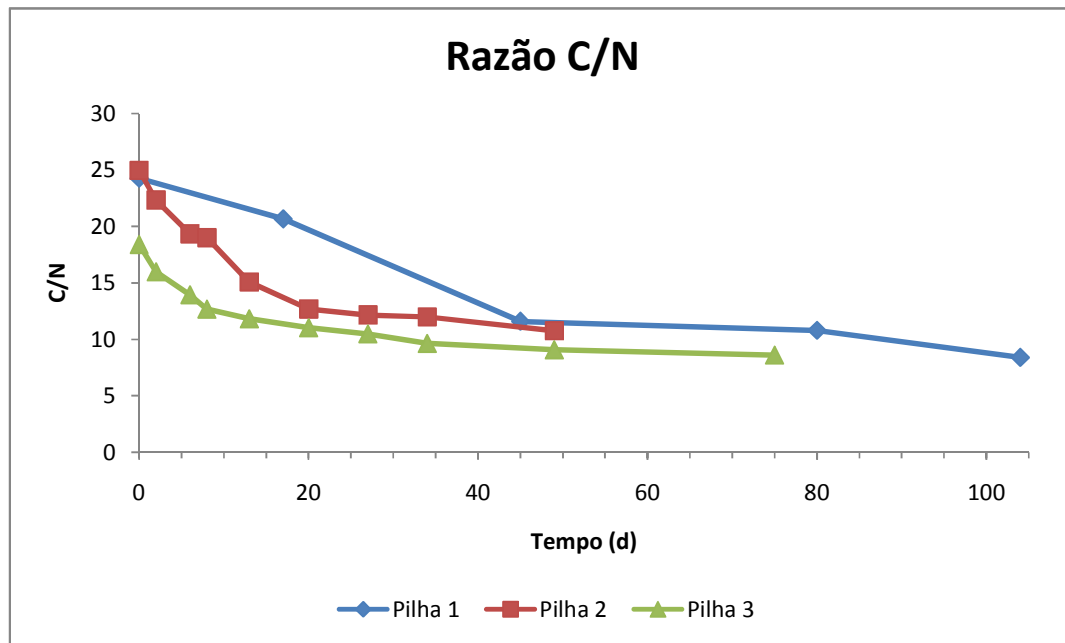


Figura 5.23 – Razão C/N, nas Pilhas 1, 2 e 3.

Os valores da razão C/N finais, apresentados na Figura 5.23 diferem pouco entre si, esta diferença aliás verifica-se exactamente a mesma razão C/N, nas Pilhas 1 e 3. Segundo Venglosky *et al.* (2005), os valores finais de razão C/N estão normalmente entre 10 e 15, o que se verifica nos três substratos.

No entanto, tomando em consideração os valores obtidos na análise elementar (valores médios obtidos com base nos Quadros do Anexo III) é possível verificar que apesar das razões C/N serem muito próximas os valores de percentagem de cada elemento variam bastante. Ou seja, as razões C/N são próximas, mas as percentagens de azoto e carbono não são. Mesmo com a adição de casca de arroz e considerando que o valor de carbono e azoto elementar estão a ser influenciados, a maior redução de carbono verificou-se para a Pilha 3, com a redução de 9,85%.

No entanto, tomando em consideração, as diferenças entre as características iniciais dos substratos, do composto final e o decorrer dos processos nos três casos, é possível dizer que

5. Apresentação e Discussão de Resultados

os três compostos são produtos estabilizados, com características favoráveis à sua aplicação na agricultura.

6. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

A Pilha 1 apresentou uma degradação mais lenta do que as Pilhas 2 e 3. No entanto, o substrato da primeira pilha consumiu uma quantidade muito superior de ar para satisfazer a estequiometria, reduzir a humidade e controlar a temperatura em relação às outras pilhas.

O ar consumido para satisfazer a necessidade estequiométrica e para controlo da temperatura foi superior na Pilha 2 em relação à Pilha 3.

Verifica-se que o ar necessário à remoção de humidade foi superior na Pilha 3 em relação às Pilhas 1 e 2.

A remoção de humidade foi bastante superior nas Pilhas 2 e 3 em relação à Pilha 1. Observou-se a maior remoção de humidade na Pilha 3.

Conclui-se que a necessidade de ar para redução da humidade, se sobrepõe às necessidades para satisfazer a estequiometria e para o controlo da temperatura.

Os valores de Q_i obtidos a partir das determinações de PCS foram, de modo geral, semelhantes aos valores de E_i , obtidos através da equação geral de redução da matéria orgânica referida por Haug (1993).

Apesar dos erros obtidos nas determinações de PCS e de humidade, foi possível verificar que grande parte do calor produzido durante a degradação, foi utilizado na evaporação da água em vez de ter sido utilizado no aumento da temperatura do substrato.

As constantes de velocidade obtidas através dos valores de SVB, para as Pilhas 1, 2 e 3, foram respectivamente, $1,60 \times 10^{-2}$, $9,50 \times 10^{-2}$ e $7,90 \times 10^{-2} d^{-1}$ o que permite concluir que a

6. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

degradação dos SVB foi bastante mais rápida na Pilha 2, seguida da Pilha 3. A Pilha 1 sofreu a degradação mais lenta.

O resultado obtido para o coeficiente de correlação para a Pilha 3, é elevado (r^2 igual a 0,9486), assim conclui-se que existe uma boa correlação dos resultados.

Através da comparação dos coeficientes de correlação obtidos a partir dos valores de SVB e CO_2 acumulado, 0,8729 e 0,9916, respectivamente, para a Pilha 1, conclui-se que os resultados de CO_2 apresentam melhor correlação.

Através da análise global do processo das três pilhas, verifica-se que a Pilha 1 em relação às Pilhas 2 e 3, apresentou valores globais inferiores de $a_{r,h}$, Q_l , $C_{evp,água}$ e redução de SVB, para um período de compostagem muito superior ao das outras pilhas. Por outro lado para uma degradação da matéria orgânica mais lenta, necessitou de valores de ar total superiores.

Analisando os resultados obtidos de Q_l e $C_{evp,água}$ verifica-se que as Pilhas 2 e 3, que decorreram num período de tempo menor apresentaram maior perda de calor. Verifica-se que a Pilha 2 obteve valores de degradação sempre superiores aos da Pilha 3.

Analisando os valores obtidos para a Pilha 1, verifica-se que de modo geral os valores são concordantes, os principais valores discordantes são os de Q_l , que foram obtidos através das determinações de PCS.

A análise do processo da Pilha 1 permite concluir que os picos de arejamento correspondem aos primeiros 17 dias. A $TA_{méd}H$ foi a taxa de arejamento determinante para o processo. A $TA_{méd}H$ determinada para esse intervalo de tempo corresponde a $30 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ kg}^{-1}$.

Através da análise do processo da Pilha 2 verifica-se que os resultados são bastante concordantes. Os principais valores discordantes são os de Q_l e de v_{SVB} , que foram obtidos através das determinações de PCS e cinzas, respectivamente.

Os picos de arejamento da Pilha 2 verificam-se para os dias de 0 a 2 e de 8 a 13. A taxa de arejamento determinante para o processo foi a $TA_{médH}$. Conclui-se então que para os primeiros 15 dias do processo dever-se-ia introduzir uma taxa de arejamento de $60 \times 10^{-3} m^3 h^{-1} kg^{-1}$.

Analisando o processo da Pilha 3 conclui-se que os resultados são concordantes. Os principais valores discordantes são os de Q_l e de $C_{evp,água}$, que foram obtidos através das determinações de PCS e ST, respectivamente.

Os picos de arejamento correspondem aos dias 0 a 2 e 8 a 13. A taxa de arejamento determinante para o processo foi a $TA_{médH}$. Conclui-se que nesta pilha se deveria introduzir uma taxa de arejamento de $100 \times 10^{-3} m^3 h^{-1} kg^{-1}$, nos primeiros 2 dias e depois reduzir até ao dia 13 para $40 \times 10^{-3} m^3 h^{-1} kg^{-1}$.

Em qualquer uma das estratégias passados os primeiros 15 dias do processo, seria possível reduzir o caudal de ar para metade, em todas as pilhas.

Analisando os resultados obtidos para as três pilhas conclui-se que a Pilha 1 apresentou uma cinética de degradação bastante mais lenta do que as outras duas pilhas. Por outro lado, conclui-se que por cada kg de substrato degradado foi utilizada uma maior quantidade de ar. Ou seja, para uma degradação mais lenta foi consumida uma quantidade de ar superior, na Pilha 1.

6. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Os valores de Q_i obtidos para a Pilha 1 são muito inferiores aos obtidos para as outras duas pilhas. O mesmo se verifica para os valores de $C_{evp,água}$, uma vez que na Pilha 1 se observou uma redução de humidade bastante inferior.

Conclui-se que a casca apresenta um efeito visível na degradação e necessidades de ar no substrato.

Nas pilhas 2 e 3 as diferenças que se verificam devem-se provavelmente às características dos substratos, que tiveram origem em diferentes suinicultores e assim, apresentaram degradabilidades diferentes.

A Pilha 2 apresentou uma maior velocidade de degradação que a Pilha 3 e consequentemente que a Pilha 1. À excepção dos valores de degradabilidade (em todo o processo) e dos valores de ar_h e $TA_{médH}$ (no intervalo de tempo de 0 a 2 dias), verificou-se que as Pilhas 2 e 3 apresentaram valores semelhantes.

Os principais erros associados às determinações, observaram-se nos valores obtidos de Q_i (determinações de PCS), v_{SVB} (determinações de SV) e de $C_{evp,água}$ (determinações de humidade).

Para a definição de estratégias de arejamento é necessário recorrer às determinações de sólidos voláteis (análise de cinzas), de humidade (análise de sólidos totais) e a taxas respirométricas (por exemplo, baseadas em consumo de CO_2), para o caso dos substratos em estudo.

Através do teor em SV e ST é possível determinar taxas de arejamento para redução de humidade e no caso de estudo, a redução de humidade foi o factor determinante nos três processos.

A adição de estruturante, como a casca de arroz, tem efeitos práticos no processo, ou seja, na remoção de humidade, alteração da estrutura e assim contribui para o aumento das taxas de reacção que permitindo obter um composto estabilizado, mais rapidamente.

Ponderando o trabalho desenvolvido, considera-se de especial interesse a elaboração de estudos futuros em que seja feito o acompanhamento mais detalhado da evolução da pilha em compostagem para as determinações dos parâmetros de controlo como a temperatura e caudal de arejamento, com o acompanhamento de índices respirométricos baseados no consumo de O₂ ou produção de CO₂.

7. Referências bibliográficas

Adani, F.; Gigliotti, G.; Velentini, F.; Laraia, R., 2003. Respiration Index Determination: a comparative of different methods. *Compost Science & Utilization* 11 (2), pp. 144-151.

Adani, F.; Lozzi, P.; Genevini, P., 2001. Determination of biological stability by oxygen uptake on municipal solid waste and derived products. *Compost Science & Utilization* 9 (2), pp. 163-178.

Albihn, A.; Vinneras, B., 2007. Biosecurity and arable use of manure and biowaste – Treatment alternatives. *Livestock Science* pp. 112, pp. 232-239.

Baffi, C.; Dell'Abate, M.T.; Nassini, A.; Silva, S.; Benedetti, A.; Gigliotti, G.; Adani, F., 2007. Determination of biological stability in compost: a comparison of methodologies. *Soil Biology & Biochemistry* 39, pp. 1284-1293.

Breitenbeck, G; Schellinger, D., 2004. Calculating the reduction in material mass and volume during composting. *Compost Science & Utilization* 12 (4), pp. 365-371.

Buckley, K.E., 2001. Pig production in straw bedded systems. *Brandon Research Centre*, Brandon, 7pp.

Choi, E., 2007. Piggery waste management, towards a sustainable future. *IWA Publishing*, London.

Chroni, C.; Kyriacou, A.; Georgaki, I.; Manios, T.; Kotsou, M; Lasaridi, K., 2009. Microbial characterization during composting of biowaste. *Waste Management* 29, pp. 1520-1525.

Comissão Europeia, 2001. *Working document – Biological treatment of biowaste – 2nd draft*. Brussels, 12 de Fevereiro de 2001.

7. Referências Bibliográficas

Das, K.; Keener, H.M., 1997. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system. *American Society of Agricultural Engineers* 40 (4), pp. 1179-1189.

Decreto-Lei n.º 118/2006. “D.R. 1ª série – A” 118 (2006-06-21) 4380. Estabelece o regime a que obedece a utilização de lamas de depuração em solos agrícolas, transpondo para a ordem jurídica nacional da Directiva n.º 86/278/CE, do Conselho, de 12 de Junho, relativa à protecção do ambiente e em especial dos solos, na utilização agrícola das lamas de depuração.

Directiva n.º 86/278/CE. Do Conselho (1986-06-12). Relativa à protecção do ambiente e em especial dos solos, na utilização agrícola das lamas de depuração.

Druilh, C.; Benoist, J.C.; Radigois, P.; Teglia, C.; Trémier, A., (2008). Sludge composting influence of the waste physical preparation on initial free air space, air permeability and specific surface. *Proceedings of the 6th International Conference Moving Organic Waste Recycling Towards Resource Management and Biobased Economy – ORBIT 2008*. Wageningen, The Netherlands, 13th – 15th October, 2008.

Ekinci, K.; Keener, H.M.; Akbolat, D., 2004. Effect of thermocouple location on the optimum composting rate. *Biosystems Engineering* 89 (3), pp. 345-353.

Ekinci, K., 2001. *Theoretical and experimental studies on the effects of aeration strategies on the composting process*. PhD Dissertation. The Ohio University, Columbus, Ohio.

EN 12176:1998, Documentation - *Characterization of sludge – Determination of ph-value*.

EN 12879:1998, Documentation - *Characterization of sludge – Determination of the loss on ignition of dry mass*.

EN 12880:2000, Documentation - *Characterization of sludge – Determination of dry residue and water content.*

Fernandes, P., 1999. *Estudo Comparativo e Avaliação de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos.* Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Finstein, M.S.; J.A. Hogan; P.F. Strom, 1987. Integration of composting process microbiology, facility structure and decision-making. Em: Hoitink, H.A.J; Keener, H.M. (Edição), Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. *Renaissance Publications*, Worthington, USA, pp. 1-23.

Finstein, M.S.; F.C. Miller; J.A. Hogan; P.F. Strom, 1987a. Analysis of EPA Guidance on Composting Sludge: Part I - Biological Heat Generation and Temperature. *BioCycle* 28 (1), pp. 20-26.

Finstein, M.S.; F.C. Miller; J.A. Hogan; P.F. Strom, 1987b. Analysis of EPA Guidance on Composting Sludge: Part II - Biological Process Control. *BioCycle* 28 (2), pp. 42-47.

Finstein, M.S.; F.C. Miller; P.F. Strom, 1986. Monitoring and evaluating composting process performance. *Journal Water Pollution Control Federation* 58 (4), pp. 272-278.

Finstein, M.S, 1980. Composting microbial ecosystem: implication process design and control. *BioCycle* 21 (4), pp. 25-27.

Finstein, M.S.; Cirello, J.; MacGregor, S.T.; F.C. Miller; Suler, D.J.; P.F. Strom, 1980. Engineering Principles of Sludge Composting [with Response]. *Journal Water Pollution Control Federation* 52 (7), pp. 2037-2044.

7. Referências Bibliográficas

Gea, T.; Richard, T.L., 2008. Evaluation of physical properties during the composting process of wastes of different biodegradable organic matter content and their influence on biodegradation kinetics. *Proceedings of the 6th International Conference Moving Organic Waste Recycling Towards Resource Management and Biobased Economy – ORBIT 2008*. Wageningen, The Netherlands, 13th – 15th October, 2008.

Gil, M.V.; Carballo, M.T.; Calvo, L.F, 2007. Fertilization of maize with compost from cattle manure supplemented with additional mineral nutrients. *Waste Management* 28 (8), pp. 1432-1440.

Gómes-Brandóm, M.; Lazcano, C.; Domínguez, J., 2008. The evaluation of stability and maturity during the composting of cattle manure. *Chemosphere* 70, pp. 436-444.

Gómez, R.B.; Lime F.V., 2006. The use of respiration indices in the composting process: a review. *Waste Management & Research* 24, pp. 37-47.

Haroun, M.; Idris, A.; Omar, S., 2008. Analysis of heavy metals during composting of the tannery sludge using physicochemical and spectroscopic techniques. *Journal of Hazardous Materials*, (por publicar).

Haug, R.T., 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Florida.

Hernández, T.; Masciandaro, G.; Moreno, J. I.; García, C., 2006. Changes in organic matter composition during composting of two digested sewage sludge. *Waste Management* 26, pp. 1370-1376.

Keener, H.M.; Ekinci, K.; Michel, F.C., Jr., 2005. Composting process optimization – using on/off controls. *Compost Science & Utilization* 13 (4), pp. 288-299.

Keener, H.M.; Marugg, C.; Hansen, R.C.; Hoitink, H.A.J., 1993. Optimizing the efficiency of the composting process. Em: Hoitink, H.A.J; Keener, H.M. (Edição), Science and engineering of composting: design, environmental, microbiological and utilization aspects. *Renaissance Publications*, Worthington, USA, pp. 59-94.

Koenig, A.; Bari, O.H., 2000. Application of self-heating test for indirect estimation of respirometric activity of compost: Theory and practice. *Compost Science & Utilization* 8, pp. 99-107.

Lasaridi, K.E.; Stentiford, E.I.; Evans, T., 2000. Windrow composting of wastewater biosolids: process performance and product stability assessment. *Water Science Management* 42, pp. 217-226.

Marques, A.S.M.L., 2008. *Valorização Orgânica do Subproduto da Destilação do Bagaço de Uva*. Dissertação de mestrado em Engenharia do Ambiente. Universidade de Aveiro, Aveiro.

Mason, I.G., 2006. Mathematical modelling of the composting process: a review. *Waste Management* 26, pp. 3-21.

Mason, I.G.; Mollah, M.S.; Zhong, M.F.; Manderson, G.J., 2004. Composting High Moisture Content Bovine Manure Using Passive Aeration. *Compost Science & Utilization* 12 (3), pp. 249-267.

Mohee, R.; Mudhoo, A., 2005. Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix. *Powder Technology* 155, pp. 92-99.

Ros, M.; García, C.; Hernández, T., 2006. A full-scale study of pig slurry by composting: Kinetic changes in chemical and microbial properties. *Waste Management* 26, pp. 1108-1118.

7. Referências Bibliográficas

Scaglia, B.; Tambone, F.; Luigi, P.; Genevini, P.L.; Adani, F., 2000. Respiration Index Determination: Dynamic and Static Approaches. *Compost Science & Utilization* 8 (2), pp. 90-98.

Silveira, A., 1997. *Contributo para o desenvolvimento do modelo cinético de compostagem*. Dissertação de doutoramento em Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Silveira, A, 1987. *Contribuição para o estudo da influência do Carbono/Azoto no processo de compostagem de resíduos urbanos*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Task force 151 and Project Horizontal, 2005. *Preparation of Horizontal standards in the fields of biowaste, sludge and soil – Determination of electrical conductivity in soil, sewage sludge and biowaste*. CEN, European Committee for Standardization.

Tchobanoglous, G.; Kreith, F.; 2002. *Handbook Of Solid Waste Management, Second Edition*. McGraw-Hill, New York.

Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S., 1993. *Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill, Singapore.

Travassos, A.C.C.S., 2006. *Contributo para o estudo das transformações do azoto no processo de compostagem de lamas agro-indústrias*. Dissertação de mestrado em Engenharia Sanitária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

Venglosky, J.; Sasakova, N.; Vargova, M.; Pacajova, Z.; Placha, I.; Petrovsky, M.; Harichova, D., 2005. Evolution of temperature and chemical parameters during composting of the pig slurry solid fraction amended with natural zeolite. *Bioresource Technology* 96, pp. 181-189.

Vu, T.K.V.; Tran, M.T.; Dang, T.T.S., 2007. A survey of manure management on pig farms in Northern Vietnam. *Livestock Science* 112, pp. 288-297.

Zhang, Y.; He, Y., 2006. Co-composting solid swine manure with pine sawdust as organic substrate. *Bioresource Technology* 97, pp. 2024-2031.

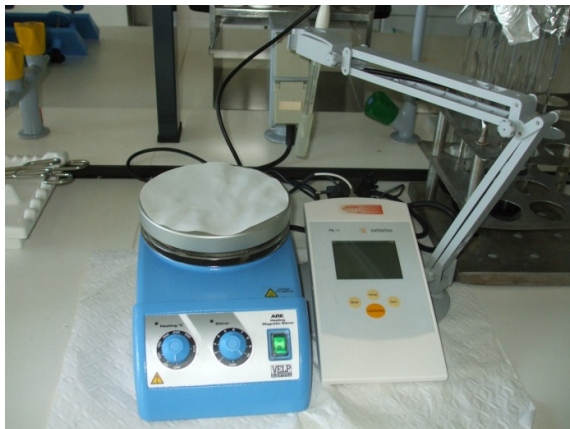
ANEXOS**Anexo I – Imagens dos equipamentos laboratoriais**

Figura A.I.1 – Placa de aquecimento Velp-Scientifica-ARE e Startorius PB-11



Figura A.I.2 – Eléctrodo Orion 4 STAR



Figura A.I.3 – Estufa CASSEL



Figura A.I.4 – Carbolite



Figura A.1.5 – Balança OHAUS Scout-Pro



Figura A.1.6 – Bomba calorimétrica ISCO
Calorimat e Auto charger - Parr



Figura A.1.7 – Balança STARTORIUS Micro



Figura A.1.8 – Analisador Elementar CNHS - O e
Registador integrador, DP200 da Carlo Erba
Instruments



Figura A.I.9 – Moinho Ultracentrífugo, do modelo LM1, da Retsch

Anexo II - PCS

Quadro A.II.1 – Poder Calorífico Superior, PCS, Pilha 1.

Dias	PCS (cal.g ⁻¹)
	Pilha 1
0	4375
17	3989
45	3875
80	3436
104	3422

Quadro A.II.2 – Poder Calorífico Superior, PCS, Pilhas 2 e 3.

Dias	PCS (cal.g ⁻¹)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	3437	3269
	3458	3422
	3463	-
	3476	-
0	3671	3388
	3485	3457
	3553	-
	3492	-
2	3394	3416
	3564	3316
6	3478	3064
	-	3087
8	3420	2829
	3482	2890
	-	3070
13	3335	2802
	3313	2981
20	3134	2885
27	3122	2883
	3085	-
34	3066	2620
49	2803	2525
	3033	2688
	2942	-
75	-	2568

Quadro A.II.3 – Poder Calorífico Superior, PCS, Pilhas 2 e 3 (valores médios).

Dias	PCS (cal.g ⁻¹)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	3550	3422
0	3550	3422
2	3479	3366
6	3478	3076
8	3451	2930
13	3324	2891
20	3134	2885
27	3104	2883
34	3066	2620
49	2926	2607
75	-	2568

Anexo III – Análise Elementar

Quadro A.III.1 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 1.

Dias	Composição Elementar (%)			
	Pilha 1			
	C	H	O	N
0	47,21	6,78	42,93	3,08
	47,19	6,80	43,45	2,55
	46,90	7,73	42,53	2,83
	46,02	7,28	43,66	3,04
	45,54	7,30	45,26	1,91
	44,49	7,05	46,21	2,26
17	41,34	8,27	48,30	2,09
	42,02	8,05	48,14	1,80
	40,70	7,99	49,20	2,11
45	36,75	7,11	53,06	3,08
	35,52	6,52	54,79	3,17
	36,98	6,54	53,30	3,18
80	34,50	6,48	55,41	3,61
	35,60	6,69	54,28	3,42
	37,16	6,59	53,33	2,91
104	40,39	5,92	47,68	6,01
	41,51	6,53	47,38	4,58
	37,14	5,04	53,66	4,16
	36,65	5,01	54,38	3,96
	32,05	4,78	59,32	3,85
	35,86	5,38	54,64	4,12

Quadro A.III.2 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 1 (valores médios).

Dias	Composição Elementar (%)			
	Pilha 1			
	C	H	O	N
0	46,22	7,34	44,01	1,91
17	41,35	8,10	48,55	2,00
45	36,42	6,72	53,72	3,14
80	35,76	6,59	54,34	3,32
104	37,27	5,44	52,84	4,45

Quadro A.III.3 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 2.

Dias	Composição Elementar (%)			
	Pilha 2			
	C	H	O	N
0 (Lama)	36,63	5,04	56,21	2,13
	37,01	4,80	56,16	2,04
	37,82	5,00	55,02	2,16
0	40,74	5,80	51,88	1,58
	38,80	4,69	54,85	1,66
	41,86	6,06	50,46	1,63
2	37,34	5,28	55,89	1,50
	38,08	5,26	55,05	1,60
	40,22	5,40	52,30	2,08
6	36,18	5,34	56,58	1,90
	37,53	5,32	55,24	1,91
8	35,97	5,71	56,23	2,09
	36,49	5,04	56,46	2,00
	38,57	5,18	54,51	1,75
13	34,07	4,37	59,22	2,34
	36,59	3,90	57,11	2,40
	37,46	5,01	55,09	2,43
20	34,56	4,37	58,09	2,99
	34,59	4,51	58,23	2,67
	34,46	4,27	58,77	2,51
27	33,53	4,30	59,69	2,47
	32,75	4,23	60,33	2,69
	36,66	4,88	55,16	3,30
34	31,73	4,27	61,14	2,87
	33,78	4,12	59,35	2,75
	35,79	4,76	56,60	2,84
49	33,18	4,52	59,63	2,68
	32,78	4,38	59,86	2,98
	32,33	4,82	59,38	3,47

Quadro A.III.4 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 2 (valores médios).

Dias	Composição Elementar (%)			
	Pilha 2			
	C	H	O	N
0 (Lama)	37,15	4,94	55,80	2,11
0	40,47	5,52	52,40	1,62
2	38,55	5,31	54,41	1,73
6	36,86	5,33	55,91	1,90
8	37,01	5,31	55,74	1,95
13	36,04	4,43	57,14	2,39
20	34,53	4,38	58,36	2,72
27	34,31	4,47	58,39	2,82
34	33,77	4,38	59,03	2,82
49	32,76	4,57	59,62	3,04

Quadro A.III.5 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 3.

Dias	Composição Elementar (%)			
	Pilha 3			
	C	H	O	N
0 (Lama)	32,92	3,99	60,97	2,12
	32,48	4,41	60,98	2,14
	30,74	4,31	62,77	2,18
0	29,32	3,63	64,88	2,18
	32,26	4,02	62,09	1,63
	35,55	4,20	58,78	1,47
2	31,43	3,84	62,88	1,85
	29,57	3,80	64,63	2,01
	29,65	3,76	64,77	1,82
6	27,81	3,39	66,94	1,85
	27,10	4,31	66,41	2,17
	28,64	3,00	66,39	1,97
8	26,56	3,55	67,62	2,28
	26,68	3,04	68,24	2,04
	28,69	3,65	65,51	2,15
13	24,22	3,29	70,08	2,41
	27,72	3,54	66,82	1,91
	26,34	2,72	68,62	2,31
20	24,31	2,67	70,79	2,23
	25,65	3,18	68,79	2,38
	25,90	3,39	68,43	2,28
27	24,10	3,19	70,14	2,57
	25,61	2,64	69,68	2,06
	25,53	3,34	68,58	2,56
34	24,43	2,61	70,56	2,40
	22,98	3,03	71,56	2,43
	23,04	3,18	71,29	2,49
49	22,38	2,97	72,21	2,44
	23,53	2,55	71,50	2,42
	23,47	3,27	70,47	2,80
75	21,12	2,88	73,22	2,79
	22,73	2,95	71,84	2,48
	23,60	3,10	70,71	2,59

Quadro A.III.6 – Composição Elementar, em C, H, O e N, da Pilha 3 (valores médios).

Dias	Composição Elementar (%)			
	Pilha 3			
	C	H	O	N
0 (Lama)	32,04	4,24	61,57	2,15
0	32,38	3,95	61,91	1,76
2	30,21	3,80	64,09	1,89
6	27,85	3,57	66,58	2,00
8	27,31	3,41	67,12	2,16
13	26,10	3,18	68,51	2,21
20	25,29	3,08	69,34	2,30
27	25,08	3,06	69,47	2,40
34	23,48	2,94	71,14	2,44
49	23,12	2,93	71,39	2,55
75	22,48	2,98	71,92	2,62

Anexo IV – Humidade

Quadro A.IV.1 – Humidade, Pilha 1.

Dias	Humidade (%)
	Pilha 1
0	78,39
	78,39
17	75,44
	75,58
45	74,37
	74,42
80	73,20
	72,83
104	72,08
	72,32

Quadro A.IV.2 – Humidade, Pilha 1 (valores médios).

Dias	Humidade (%)
	Pilha 1
0	78,39
17	75,51
45	74,39
80	73,02
104	72,20

Quadro A.IV.3 – Humidade, Pilhas 2 e 3.

Dias	Humidade (%)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	68,27	77,21
	69,49	76,07
0	68,34	71,33
	67,74	73,64
2	66,39	69,77
	66,28	70,00
6	62,77	67,50
	62,74	67,64
8	62,99	68,51
	63,19	68,44
13	56,69	63,48
	58,95	63,83
20	49,08	58,36
	48,90	57,98
27	42,47	52,72
	42,71	52,87
34	37,22	48,74
	37,24	48,49
49	37,05	39,48
	37,23	39,50
	37,09	-
	37,32	-
75	-	39,07
	-	39,61
	-	39,39

Quadro A.IV.4 – Humidade, Pilhas 2 e 3 (valores médios).

Dias	Humidade (%)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	68,88	76,64
0	68,04	72,49
2	66,33	69,88
6	62,75	67,57
8	63,09	67,48
13	57,82	63,66
20	48,99	58,17
27	42,59	52,80
34	37,23	48,61
49	37,17	39,49
75	-	39,36

Anexo V – Sólidos Voláteis

Quadro A.V.1 – Sólidos Voláteis, Pilha 1.

Dias	Sólidos Voláteis (% ps)
	Pilha 1
0	89,10
	89,05
	88,32
17	87,55
	86,44
	85,66
45	78,74
	78,33
	79,91
80	76,55
	75,62
	75,87
104	68,65
	72,08

Quadro A.V.2 – Sólidos Voláteis, Pilha 1 (valores médios).

Dias	Sólidos Voláteis (% ps)
	Pilha 1
0	88,82
17	86,55
45	78,99
80	76,01
104	70,34

Quadro A.V.3 – Sólidos Voláteis, Pilhas 2 e 3.

Dias	Sólidos Voláteis (% ps)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	73,60	68,69
	76,40	69,23
	-	67,45
0	77,80	70,15
	77,40	70,23
2	77,80	69,99
	77,00	70,00
	-	69,94
6	76,00	69,20
	77,00	69,80
8	72,20	66,80
	75,60	67,20
13	72,42	65,34
	73,23	66,09
	73,63	65,60
20	70,75	64,50
	70,62	63,99
	70,95	64,20
27	68,79	60,71
	68,97	61,54
	69,60	60,54
34	69,60	58,25
	67,60	58,73
	-	59,08
49	64,40	56,20
	66,40	57,60
75	-	51,70
	-	53,34

Quadro A.V.4 – Sólidos Voláteis, Pilhas 2 e 3 (valores médios).

Dias	Sólidos Voláteis (% ps)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	75,00	68,46
0	77,60	70,19
2	77,40	69,98
6	76,50	69,50
8	73,90	67,00
13	73,09	65,68
20	70,77	64,23
27	69,12	60,93
34	68,60	58,69
49	65,40	56,90
75	-	52,52

Anexo VI – pH

Quadro A.VI.1 – pH, Pilha 1.

Dias	pH
	Pilha 1
0	8,39
17	7,89
45	7,77
80	7,39
104	7,33

Quadro A.VI.2 – pH, Pilhas 2 e 3.

Dias	pH	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	8,92	8,73
	8,90	8,64
0	8,79	8,66
	8,82	8,62
2	8,94	8,97
	8,96	8,97
6	8,86	8,87
	8,86	8,87
8	8,86	8,80
	8,73	8,85
13	8,57	8,65
	8,58	8,67
20	8,44	8,52
	8,46	8,56
27	8,21	8,15
	8,33	8,14
34	8,15	7,79
	8,11	7,98
49	8,03	7,41
	8,04	7,33
75	-	7,13
	-	7,19

Quadro A.VI.3 – pH, Pilhas 2 e 3 (valores médios).

Dias	pH	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	8,91	8,69
0	8,81	8,64
2	8,95	8,97
6	8,86	8,87
8	8,80	8,83
13	8,58	8,66
20	8,45	8,54
27	8,27	8,15
34	8,13	7,89
49	8,04	7,37
75	-	7,16

Anexo VII – Condutividade

Quadro A.VII.1 – Condutividade, Pilhas 2 e 3.

Dias	Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	1279,00	1291,00
	1276,00	1344,00
0	1396,00	1259,00
	1387,00	1262,00
2	1238,00	1234,00
	1245,00	1250,00
6	1184,00	1160,00
	1197,00	1191,00
8	1254,00	1230,00
	1338,00	1260,00
13	1418,00	1333,00
	1416,00	1320,00
49	1793,00	2202,00
	1741,00	2145,00
75	-	2337,00
	-	2516,00

Quadro A.VII.2 – Condutividade, Pilhas 2 e 3 (valores médios).

Dias	Condutividade ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	1277,50	1317,50
0	1391,50	1260,50
2	1241,50	1242,00
6	1190,50	1175,50
8	1296,00	1245,00
13	1417,00	1326,50
49	1767,00	2173,50
75	-	2426,50

Anexo VIII – Ar

Quadro A.VIII.1 – ar_e , Pilha 1.

Data	ar_e (kg)
	Pilha 1
0 - 17	2831
17 - 45	4449
45 - 80	657
80 - 104	840

Quadro A.VIII.2 – ar_e , Pilhas 2 e 3.

Data	ar_e (kg)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	956	841
2 - 6	856	791
6 - 8	154	371
8 - 13	1389	417
13 - 20	655	257
20 - 27	91	156
27 - 34	140	324
34 - 49	233	78
49 - 75	-	108

Quadro A.VIII.3 – ar_h , Pilha 1.

Data	ar_h (kg)
	Pilha 1
0 - 17	18992
17 - 45	17683
45 - 80	4509
80 - 104	4370

Quadro A.VIII.4 – ar_h , Pilhas 2 e 3.

Data	ar_h (kg)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	3795	6573
2 - 6	5665	4493
6 - 8	296	1953
8 - 13	6571	4682
13 - 20	4907	4707
20 - 27	1983	3884
27 - 34	1258	2058
34 - 49	242	2687
49 - 75	-	494

Quadro A.VIII.5 – ar_t , Pilha 1.

Data	ar_t (kg)
	Pilha 1
0 - 17	6075
17 - 45	16895
45 - 80	552
80 - 104	969

Quadro A.VIII.6 – ar_t , Pilhas 2 e 3.

Data	ar_t (kg)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	663	666
2 - 6	830	459
6 - 8	54	345
8 - 13	2492	210
13 - 20	664	130
20 - 27	21	159
27 - 34	16	193
34 - 49	104	34
49 - 75	-	96

Anexo IX – Taxas de arejamento

Quadro A.IX.1 – $TA_{méd}E$, Pilha 1.

Data	$TA_{méd}E$ ($m^3 \cdot h^{-1} kg^{-1}$)
	Pilha 1
0 - 17	$4,23 \times 10^{-3}$
17 - 45	$0,21 \times 10^{-3}$
45 - 80	$2,04 \times 10^{-3}$
80 - 104	$4,05 \times 10^{-3}$

Quadro A.IX.2 – $TA_{méd}E$, Pilhas 2 e 3.

Data	$TA_{méd}E$ ($m^3 \cdot h^{-1} kg^{-1}$)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	$10,80 \times 10^{-3}$	$13,44 \times 10^{-3}$
2 - 6	$5,16 \times 10^{-3}$	$6,81 \times 10^{-1}$
6 - 8	$2,05 \times 10^{-3}$	$6,78 \times 10^{-3}$
8 - 13	$7,68 \times 10^{-3}$	$3,37 \times 10^{-3}$
13 - 20	$3,23 \times 10^{-3}$	$1,57 \times 10^{-3}$
20 - 27	$0,52 \times 10^{-3}$	$1,02 \times 10^{-3}$
27 - 34	$0,84 \times 10^{-3}$	$2,43 \times 10^{-3}$
34 - 49	$0,66 \times 10^{-3}$	$0,30 \times 10^{-3}$
49 - 75	-	$0,26 \times 10^{-3}$

Quadro A.IX.3 – $TA_{méd}H$, Pilha 1.

Data	$TA_{méd}H$ ($m^3 \cdot h^{-1} kg^{-1}$)
	Pilha 1
0 - 17	$30,31 \times 10^{-3}$
17 - 45	$21,16 \times 10^{-3}$
45 - 80	$7,39 \times 10^{-3}$
80 - 104	$12,39 \times 10^{-3}$

Quadro A.IX.4 – $TA_{méd}H$, Pilhas 2 e 3.

Data	$TA_{méd}H$ ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot kg^{-1}$)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	$61,70 \times 10^{-3}$	$105,05 \times 10^{-3}$
2 - 6	$49,14 \times 10^{-3}$	$38,69 \times 10^{-3}$
6 - 8	$56,70 \times 10^{-3}$	$35,65 \times 10^{-3}$
8 - 13	$52,28 \times 10^{-3}$	$37,84 \times 10^{-3}$
13 - 20	$34,82 \times 10^{-3}$	$28,83 \times 10^{-3}$
20 - 27	$16,37 \times 10^{-3}$	$25,35 \times 10^{-3}$
27 - 34	$10,78 \times 10^{-3}$	$15,46 \times 10^{-3}$
34 - 49	$9,87 \times 10^{-3}$	$10,34 \times 10^{-3}$
49 - 75	-	$1,18 \times 10^{-3}$

Quadro A.IX.5 – $TA_{méd}T$, Pilha 1.

Data	$TA_{méd}T$ ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot kg^{-1}$)
	Pilha 1
0 - 17	$9,70 \times 10^{-3}$
17 - 45	$20,22 \times 10^{-3}$
45 - 80	$0,90 \times 10^{-3}$
80 - 104	$2,75 \times 10^{-3}$

Quadro A.IX.6 – $TA_{méd}T$, Pilhas 2 e 3.

Data	$TA_{méd}T$ ($m^3 \cdot h^{-1} \cdot kg^{-1}$)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	$10,79 \times 10^{-3}$	$10,64 \times 10^{-3}$
2 - 6	$7,20 \times 10^{-3}$	$3,95 \times 10^{-3}$
6 - 8	$1,04 \times 10^{-3}$	$6,30 \times 10^{-3}$
8 - 13	$19,83 \times 10^{-3}$	$1,69 \times 10^{-3}$
13 - 20	$4,71 \times 10^{-3}$	$0,79 \times 10^{-3}$
20 - 27	$0,17 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-3}$
27 - 34	$0,13 \times 10^{-3}$	$1,45 \times 10^{-3}$
34 - 49	$0,42 \times 10^{-3}$	$0,13 \times 10^{-3}$
49 - 75	-	$0,23 \times 10^{-3}$

Anexo X - Calor libertado (Q_i), energia libertada (E_i) e calor utilizado na evaporação da água ($C_{evp,água}$)

Quadro A.X.1 – Calor libertado (Q_i), Pilha 1.

Dias	Q_i (kcal)
	Pilha 1
0 - 17	2199802
17 - 45	2600202
45 - 80	955615
80 - 104	645605

Quadro A.X.2 – Calor libertado (Q_i), Pilhas 2 e 3.

Dias	Q_i (kcal)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	178842	469511
2 - 6	274620	365534
6 - 8	720958	50153
8 - 13	345074	467923
13 - 20	668563	521612
20 - 27	299054	594459
27 - 34	115398	244645
34 - 49	542123	407330
49 - 75	-	11136

Quadro A.X.3 – Energia libertado (E_i), Pilha 1.

Dias	E_i (kcal)
	Pilha 1
0 - 17	2215531
17 - 45	3544383
45 - 80	556250
80 - 104	695845

Quadro A.X.4 – Energia libertado (E_i), Pilhas 2 e 3.

Dias	E_i (kcal)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	744500	665401
2 - 6	685796	616722
6 - 8	135503	330276
8 - 13	1127509	341088
13 - 20	542642	221628
20 - 27	80295	185551
27 - 34	112453	281485
34 - 49	196830	85235
49 - 75	-	144937

Quadro A.X.5 – Calor utilizado na evaporação da água ($C_{\text{evp,água}}$), Pilha 1.

Dias	$C_{\text{evp,água}}$ (kcal)
	Pilha 1
0 - 17	1402416
17 - 45	1600628
45 - 80	405679
80 - 104	451850

Quadro A.X.6 – Calor utilizado na evaporação da água ($C_{\text{evp,água}}$), Pilhas 2 e 3.

Dias	$C_{\text{evp,água}}$ (kcal)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 - 2	457418	469511
2 - 6	463729	365534
6 - 8	31615	50153
8 - 13	559072	467923
13 - 20	706892	521612
20 - 27	186352	594459
27 - 34	119710	244645
34 - 49	23191	407330
49 - 75	-	11136

Anexo XI – Peso da Pilha

Quadro A.XI.1 – Peso da Pilha 1.

Dias	P (kg SV ps bcc)
	Pilha 1
0	1843
17	1492
45	872
80	735
104	550

Quadro A.XI.2 – Peso das Pilhas 2 e 3.

Dias	P (kg SV ps bcc)	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	1515	1321
0	1610	1595
2	1591	1579
6	1512	1544
8	1316	1375
13	1262	1296
20	1125	1217
27	1040	1056
34	1015	962
49	878	894
75	-	678

Anexo XII – CO₂ AcumuladoQuadro A.XII.1 – CO₂ acumulado, Pilha 1.

Dias	CO ₂ acumulado (g.kg ⁻¹ ps)
	Pilha 1
0	307,52
17	259,70
45	125,12
80	72,31
104	42,51

Quadro A.XII.2 – CO₂ acumulado, Pilhas 2 e 3.

Dias	CO ₂ acumulado (g.kg ⁻¹ ps)	
	Pilha 2	Pilha 3
0	180,28	137,22
49	87,22	-
75	-	24,90

Anexo XIII - Razão C/N

Quadro A.XIII.1 – Razão C/N, Pilha 1.

Dias	Razão C/N
	Pilha 1
0	24
17	21
45	12
80	11
104	8

Quadro A.XIII.2 – Razão C/N, Pilhas 2 e 3.

Dias	Razão C/N	
	Pilha 2	Pilha 3
0 (Lama)	18	15
0	25	18
2	22	16
6	19	14
8	19	13
13	15	12
20	13	11
27	12	10
34	12	10
49	11	9
75	-	9