



Ana Patrícia De Oliveira Gomes

Monitorização de uma instalação laboratorial de compostagem

25 de Janeiro de 2011



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Monitorização de uma instalação laboratorial de compostagem

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA DA FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Química

Ana Patrícia De Oliveira Gomes

Orientadora:

Professora Doutora Margarida Maria João de Quina

“Dez mil dificuldades não constituem uma dúvida”

Isaac Newton

*Aos meus pais pelo Amor e carinho, e
por todo o apoio nos momentos mais difíceis
pelos quais passei estes últimos anos*

Agradecimentos

Ao chegar ao fim de uma das mais importantes e difíceis etapas da minha vida, não esquecerei o apoio e incentivo que me foram dadas durante a realização desta dissertação, sem os quais não teria tido êxito. Deixo aqui o meu profundo agradecimento às pessoas que me ajudaram e apoiaram ao longo deste tempo.

À Professora Doutora Margarida Quina, o meu profundo agradecimento pela amizade demonstrada, pelo apoio, disponibilidade, ajuda e orientação demonstrados ao longo deste período.

À Engenheira Micaela Soares, pela amizade, pela disponibilidade, paciência, e por toda ajuda prestada sem os quais seria difícil a execução deste trabalho.

À empresa SIA – Sociedade Industrial Aperitivos, Lda por ter disponibilizado as cascas de batata para a realização deste trabalho.

À ESAC - Escola Superior Agrária de Coimbra por terem disponibilizado a palha.

Aos funcionários do DEQ, Sr. Amado e D. Dulce, pela sua colaboração e elementos facultados para a realização deste trabalho e a sua boa disposição.

Ao funcionário da oficina do DEQ, Sr. José Santos, por toda a ajuda na concepção da montagem experimental.

À minha família por me terem apoiado a chegar ao fim da minha vida académica, sem a qual não teria conseguido.

À Patrícia e ao Hugo pela amizade, carinho e ajuda demonstrados, principalmente nestas últimas semanas.

Ao João pela amizade e ajuda disponibilizada ao longo deste trabalho.

A todos um muito obrigada!

Resumo

Este trabalho teve como principal objectivo a monitorização de uma instalação laboratorial de compostagem, em particular determinar a influência da taxa de arejamento na actividade microbiana ao longo do processo.

O estudo consistiu na programação de três experiências relativamente as quais foram acompanhados diversos parâmetros do processo, tais como temperatura, caudal de arejamento, teor de humidade, teor de matéria orgânica, pH, condutividade eléctrica, razão C/N, densidade *bulk* e *free air space*. A avaliação da estabilidade do composto foi sendo medida através da determinação do *Specific Oxygen Uptake Rate* – SOUR.

A instalação laboratorial consistiu num sistema de três reactores em paralelo com geometria cilíndrica, com 80 cm de altura e 44 cm de diâmetro, isolados termicamente do exterior. No sistema, utilizou-se arejamento forçado, através da introdução de ar comprimido na base do reactor.

A mistura de compostagem testada nos três reactores foi preparada com base nos seguintes materiais: palha de trigo (com elevado teor de carbono), casca de batata e aparas de relva (com elevado teor de azoto), sendo as suas proporções foram determinadas com base nas suas composições (18 %, 30 % e 52 % para a palha de trigo, aparas de relva e casca de batata respectivamente).

Os resultados obtidos permitiram verificar que o caudal de arejamento é um dos parâmetros que mais afectam o processo de compostagem, dado que a taxa de arejamento determina se a actividade microbiana é ou não aeróbia e se o balanço energético permite que as condições termofílicas se mantêm na mistura. Neste âmbito, foi quantificado o *Oxygen Uptake Rate* (OUR) o qual atingiu valores máximos de 3,20; 3,93 e 3,91 gO₂/h, e tendo diminuído até se atingirem valores de 0,07; 0,02 e 0,02 gO₂/h no final.

Os gradientes espaciais de temperatura mostraram que, no interior do reactor podem desenvolver-se gradientes significativos, tendo sido registado como valor máximo de 23,8 °C e valor mínimo de 0,9 °C. Estes gradientes justificam a grande importância da homogeneização da mistura, no sentido de garantir um bom nível de humificação da mistura.

Para avaliar a estabilidade do composto realizaram-se testes de respirometria, os quais não permitiram concluir acerca do grau de estabilidade do composto, devido ao facto de os resultados não serem conclusivos.

Este trabalho permitiu concluir que a taxa de arejamento deverá ser seleccionada como variável de controlo do processo em ensaios futuros.

Abstract

The main goal of this work consisted on the motorization of a laboratorial composting installation, in order to ascertain the influence of aeration rate on microbial activity throughout the process.

The study consisted in the programming of three experiences in which several parameters of the process were analysed, such as, the temperature, aeration flow rate, moisture content, organic matter content, pH, electrical conductivity, C/N ratio, bulk density and free air space. Through the measurement of the Specific Oxygen Uptake Rate (SOUR), the evaluation of the stability of the compost was obtained.

The laboratorial installation consisted on three reactors system in parallel with cylindrical geometry, 80 cm of height, 44 cm of diameter and thermal isolation. In order to accelerate the degradation process, the introduction of compressed air at the base of the reactor was used.

The tested composting mixture on the three reactors was prepared with the following materials: wheat straw (with high carbon content), peel potatoes and grass clipping (with high nitrogen content), with their proportions determined on the base of their compositions (18% to wheat straw, 30% to grass clippings and 52% to peel potatoes).

The analysis of the obtained results allows concluding that the aeration flow rate is one of the parameters that most affect the composting process, since the aeration flow rate determines if the microbial activity is aerobic or anaerobic and whether the energy balance allows thermophilic conditions to remain in the mixture. In this context, the Oxygen Uptake Rate (OUR) was quantified reaching maximum values of 3.20; 3.93 and 3.91 gO₂/h and decreased until the values of 0.07; 0.02 and 0.02 gO₂/h were reached.

The temperature space gradients analysis showed that significant gradients can be developed in the reactors interior, reaching a maximum value of 23.8 °C and a minimum of 0.9 °C.

These gradients justify the great importance of the mixture homogenization to ensure a good level of humidification of the mixture.

Respirometry tests were taken in order to evaluate the stability of the compost, which were inconclusive not allowing taking any conclusions about the stability degree of the compound.

By the analysis of this work results we can conclude that the aeration flow rate should be taken in consideration as control variable of the process in future laboratorial tests.

ÍNDICE

Resumo	v
Abstract.....	vii
Acrónimos.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. Resíduos sólidos	3
2.2. O processo de compostagem.....	6
2.3. Classificação dos sistemas de compostagem	7
2.3.1. Sistemas Abertos.....	8
2.3.2. Sistemas Fechados	9
2.4. Fases determinantes para o processo	9
2.4.1. Fases do processo.....	9
2.4.2. Factores que afectam o processo.....	11
2.4.3. Materiais usados no processo.....	14
2.5. Avaliação da estabilidade do composto.....	15
2.6. Instalações laboratoriais para análise do processo de compostagem....	18
2.7. Estado da arte	20
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	24
3.1. Descrição da instalação experimental utilizada	24
3.2. Preparação da mistura.....	25
3.3. Monitorização do processo de compostagem	26
3.4. Plano de Amostragem.....	26
3.4.1. Determinação do teor de humidade	27
3.4.2. Determinação do teor da matéria orgânica	27
3.4.3. Determinação do pH e da condutividade eléctrica.....	28
3.4.4. Determinação do carbono orgânico	29
3.4.5. Determinação do azoto pelo método de Kjeldhal	29
3.4.6. Determinação da densidade <i>bulk</i>	30
3.4.7. Determinação do <i>free air space</i>	30
3.4.8. Determinação do SOUR.....	31
4. ANÁLISE E DISCUSÃO DE RESULTADOS	33
4.1. Monitorização do processo de compostagem	33
4.1.1. Monitorização da temperatura	33
4.1.2. Monitorização do caudal de arejamento	35
4.1.3. Monitorização de outros parâmetros.....	39
4.2. Análise dos gradientes espaciais de temperatura.....	45
4.3. Análise da estabilidade do composto.....	48

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO.....	52
Bibliografia	54
ANEXO A – Características dos equipamentos utilizados.....	A1
ANEXO B – Calibração dos rotâmetros.....	B1
ANEXO C – Procedimento do revolvimento e pesagem dos reactores	C1
ANEXO D – Preparação das soluções para o teste de Respirometria.....	D1
ANEXO E – Resultados numéricos dos perfis de temperatura	E1

Acrónimos

APA	- Agência Portuguesa do Ambiente
C	- Carbono
COD	- <i>Chemical Oxygen Demand</i> (Carência Química Oxigénio)
DO	- <i>Dissolved Oxygen</i> (Oxigénio Dissolvido)
DRI	- <i>Dynamic Respiration Index</i> (Índice Respirométrico Dinâmico)
DS	- <i>Dry Solids</i> (Sólidos Secos)
FAS	- <i>Free Air Space</i>
H	- Humidade
LER	- Lista Europeia Resíduos
MO	- Matéria Orgânica
N	- Azoto
OUR	- <i>Oxygen Uptake Rate</i> (Taxa Consumo Oxigénio)
PCB	- Bifenilos Policlorados
PERSU	- Plano Estratégico Resíduos Sólidos Urbanos
RQ	- <i>Respiratory Quotient</i> (Quociente de Respiração)
RSU	- Resíduos Sólidos Urbanos
SOUR	- <i>Specific Oxygen Uptake Rate</i> (Taxa Específica de Consumo de Oxigénio)
SRI	- <i>Static Respirometric Index</i> (Índice Respirométrico Estático)
TC	- <i>Total Carbon</i> (Carbono Total)
VS	- <i>Volatile Solids</i> (Sólidos Voláteis)

1. INTRODUÇÃO

As actuais directivas comunitárias colocam ênfase na necessidade de encontrar métodos alternativos à deposição de resíduos em aterro. Neste âmbito, o processo de compostagem constitui uma alternativa que tem merecido particular atenção, dadas as inúmeras vantagens e desvantagens, designadamente em relação aos resíduos de natureza orgânica biodegradável.

Tendo por base a problemática exposta, a motivação principal para a realização deste trabalho resulta da vontade de dar uma contribuição positiva para o conhecimento do processo de compostagem.

A realização deste trabalho consistiu na monitorização de uma instalação experimental de compostagem em termos práticos, melhorar a operação deste processo à escala laboratorial, designadamente em relação ao estudo da influência da taxa de arejamento na actividade microbiana ao longo do processo de compostagem.

O presente trabalho vem no seguimento de outros estudos realizados no âmbito do processo de compostagem. Assim, Moura (2007) estudou processos de compostagem à escala piloto/laboratorial caracterizando física e quimicamente os compostos. Martins (2007) realizou estudos laboratoriais sobre o processo de compostagem com objectivo de avaliar a evolução de parâmetros ao longo do processo e determinar a sua cinética. Ribeiro (2008) realizou estudos acerca da valorização de resíduos agro-alimentares (a casca de ovo), conjuntamente com resíduos agro-pecuários de modo a produzir um biofertilizante. Andrade (2010) realizou estudos laboratoriais sobre a conversão de matéria orgânica em biofertilizantes, avaliando a influência de parâmetros, tais como a temperatura, caudal de arejamento, razão C/N, teor de matéria orgânica, humidade, pH e condutividade eléctrica.

A presente dissertação encontra-se dividida em vários capítulos. No capítulo 2, apresenta-se um enquadramento do trabalho, fazendo referência à problemática dos resíduos na sociedade. É também apresentada uma breve descrição do processo de compostagem, referindo ainda os diversos factores que afectam o processo, as suas vantagens e desvantagens e os diferentes sistemas de compostagem.

No capítulo 3, são apresentadas as metodologias utilizadas no trabalho descrevendo a monitorização do processo e o plano de amostragem.

No capítulo 4, apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos durante o trabalho, havendo sempre a preocupação de os comparar com a literatura.

No capítulo 5, destacam-se as principais conclusões deste trabalho e são também indicadas sugestões de trabalho a realizar no futuro.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento acentuado da produção de resíduos sólidos, devido a uma vida exageradamente consumista, fruto do avanço tecnológico. Isso afasta-nos, lamentavelmente, de um modelo de desenvolvimento sustentável. Como consequência desse fenómeno, o tratamento e destino final dos resíduos sólidos tornou-se um processo de grande importância nas políticas sociais e ambientais dos países mais desenvolvidos. Em geral, a consciencialização e sensibilização da população é muito importante para a resolução deste problema, de modo que as pessoas sejam confrontadas com o que sucede aos resíduos que produzem diariamente.

A deposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), em aterros sanitários, tem sido o método de eliminação mais implementado no nosso país, o qual apresenta algumas desvantagens que poderiam ser ultrapassadas, com a adopção de outros tratamentos mais eficazes.

Regra geral, a maior fracção destes resíduos corresponde à matéria orgânica e um dos processos mais adequados para este tipo de material é a compostagem.

2.1. Resíduos sólidos

Actualmente, os resíduos sólidos constituem um importante problema a nível nacional, sendo absolutamente necessário reduzir a sua quantidade. Para mitigar os seus efeitos sobre o ambiente e saúde pública, é imprescindível garantir a sua gestão adequada tendo por base as restrições económicas.

De acordo com o Decreto-Lei nº178/2006, de 5 Setembro, os «Resíduos» são definidos como qualquer substância ou objecto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer.”

Para garantir uma melhor gestão dos resíduos produzidos é fundamental estabelecer a sua classificação quanto ao tipo, por exemplo, atendendo à sua tipologia, em resíduos urbanos, industriais, hospitalares, agrícolas e outros. O Decreto-Lei nº178/2006, de 5 Setembro, define estas tipologias do seguinte modo:

Resíduo urbano: o resíduo proveniente de habitações bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações;

Resíduo industrial: o resíduo gerado em processos produtivos industriais, bem como o que resulte das actividades de produção e distribuição de electricidade, gás e água;

Resíduo hospitalar: o resíduo resultante de actividades médicas desenvolvidas em unidades de prestação de cuidados de saúde, em actividades de prevenção, diagnóstico, tratamento, reabilitação e investigação, relacionada com seres humanos ou animais, em farmácias, em actividades médico-legais, de ensino e em quaisquer outras que envolvam procedimentos evasivos, tais como acupunctura, piercings e tatuagens;

Resíduo agrícola: o resíduo proveniente de exploração agrícola e ou pecuária ou similar.

Para além das principais tipologias mencionadas, também a Lista Europeia de Resíduos (LER) classifica os resíduos em vinte categorias, onde se incluem também os resíduos de embalagens, os pneus usados, os óleos usados, os veículos em fim de vida, os resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos, os resíduos de construção e demolição, as lamas, os bifenilos policlorados (PCB) e os resíduos biodegradáveis. A nível de perigosidade, os resíduos podem classificar-se em perigosos, não perigosos e inertes.

A actual política integrada de gestão de resíduos traduz-se maioritariamente na prevenção da quantidade e da perigosidade de resíduos, bem como na maximização das quantidades recuperadas para a valorização, tendo presente a minimização de resíduos enviados para a sua eliminação. Deste modo, uma gestão adequada deve permitir o controlo da produção, armazenamento, recolha, transporte, processamento e destino final dos resíduos sólidos, de acordo com os melhores princípios de preservação da saúde pública, da economia, da engenharia, da conservação dos recursos e de outros princípios ambientais. Assim, a gestão de resíduos envolve uma inter-relação entre vários ramos administrativos, financeiros, legais, de planeamento e engenharia e soluções que envolvem a área da ciência e da tecnologia proveniente, de muitas outras

sub-áreas como a engenharia, a sociologia, a economia, o planeamento regional, o ordenamento do território, a demografia entre outros.

Em Portugal, existe actualmente o Plano Estratégico dos Resíduos Sólidos Urbanos (PERSU), o qual define a estratégia prática para a gestão integrada dos resíduos de acordo com a actual política comunitária.

Este plano foi publicado na Portaria nº187/2007, de 12 de Fevereiro, e aplica-se no período de 2007 a 2016.

Actualmente, existem vários destinos para os resíduos sólidos nomeadamente, a reciclagem, a reutilização, a compostagem, a valorização energética e o aterro. O aterro é o destino mais frequente para os resíduos sólidos urbanos, o qual apresenta alguns impactes negativos para o ambiente e sociedade, nomeadamente, a ocupação de grandes áreas, a imagem negativa ao nível paisagístico, a libertação de odores incomodativos e a produção de lixiviados que podem atingir, não só os solos, mas também, o meio aquático circundante.

Todos estes aspectos negativos associados ao aterro, levam à necessidade de reduzir a quantidade de resíduos com este destino. Para alcançar este objectivo as entidades competentes devem promover alternativas ao nível da gestão integrada de resíduos sólidos.

Em Portugal, no ano de 2009, das 5.184.592 toneladas de resíduos sólidos urbanos produzidos, foram depositadas em aterro cerca de 3.200.000 toneladas, o que equivale aproximadamente a 62 % dos resíduos produzidos (APA, 2010).

A Figura 2.1 mostra que, em Portugal, a produção de resíduos sólidos urbanos apresenta um crescimento absoluto de cerca de 0,59 % face ao ano de 2008, o que corresponde a 30.000 toneladas. Relativamente à quantidade de resíduos que são produzidos por habitante, verifica-se que a capitação anual relativamente ao ano de 2009 foi de 511 kg/hab.ano, correspondendo a uma produção diária de resíduo de 1,4 kg por habitante.

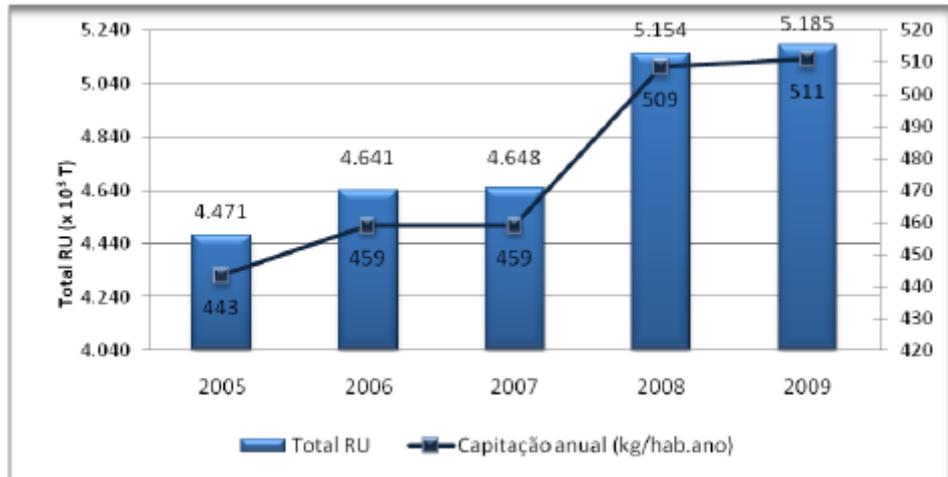


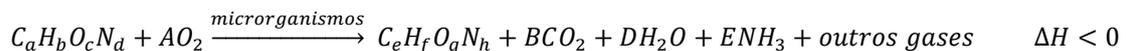
Figura 2.1 – Evolução da produção e captação de Resíduos Sólidos Urbanos em Portugal (APA).

2.2. O processo de compostagem

A correcção da matéria orgânica dos solos, usando dejectos de animais e resíduos vegetais, é praticada desde que os solos começaram a ser cultivados para a produção vegetal, tendo sido o principal meio de restabelecer o balanço de nutrientes no solo (Avnimelech e Chen, 1986). Neste âmbito, a compostagem tem servido, nos últimos anos, como o método de reciclagem de resíduos domésticos para a obtenção de fertilizante orgânico, sendo um processo conhecido pelos agricultores há muito tempo.

Este é um processo de valorização da matéria orgânica, que consiste na decomposição de resíduos orgânicos por acção de microrganismos na presença de oxigénio, produzindo um composto estável que pode ser utilizado como fertilizante.

Para além do produto final, um composto húmico estável, são libertados entre outros subprodutos, o vapor de água, o dióxido de carbono e a amónia. O processo de compostagem pode traduzir-se na seguinte reacção exotérmica (Hoyos *et al.*, 2000):



Ao longo do processo de compostagem, é imprescindível promover as condições operatórias necessárias para o crescimento microbiano aeróbio, a fim de favorecer a degradação da matéria orgânica. De entre as diversas variáveis que mais influenciam o processo destacam-se a temperatura, humidade, matéria orgânica, razão C/N, pH, condutividade eléctrica, e a concentração de oxigénio nos espaços intersticiais.

No decorrer do processo de compostagem, o volume de mistura diminui relativamente ao inicial, principalmente devido à decomposição da matéria orgânica em dióxido de carbono, água e azoto libertado sob a forma de amoníaco. No entanto, ocorre o aumento da concentração de alguns elementos que não se inserem no grupo das substâncias voláteis tais como o fósforo, potássio, cálcio entre outros (Martins, 2007).

A tecnologia subjacente ao processo de compostagem tem-se desenvolvido de forma a potenciar as vantagens e minimizar as suas limitações. De entre as principais vantagens destacam-se: a rápida conversão dos resíduos sólidos orgânicos num produto final biologicamente estável; a recuperação do resíduo sob a forma de composto, podendo ser utilizado na agricultura como correctivo de solos; a higienização do material devido às reacções exotérmicas; a estabilização; menor quantidade de energia requerida comparativamente com outras vias de tratamento; a flexibilidade na escala de operação e os ganhos ambientais resultantes (Russo, 2003; Bari *et al.*, 2001).

Como principais desvantagens, o processo de compostagem pode conduzir a um produto final sem qualidade para aplicação nos solos; a libertação de odores quando o arejamento não é suficiente; a necessidade de maior área de terreno disponível do que nos outros processos de tratamento, requerendo assim maior utilização de mão-de-obra (Russo, 2003).

2.3.Classificação dos sistemas de compostagem

Os sistemas de compostagem podem ser classificados em sistemas abertos e sistemas fechados, quando se considera o tipo de fronteira, e a Figura 2.2 mostra esquematicamente esta classificação.

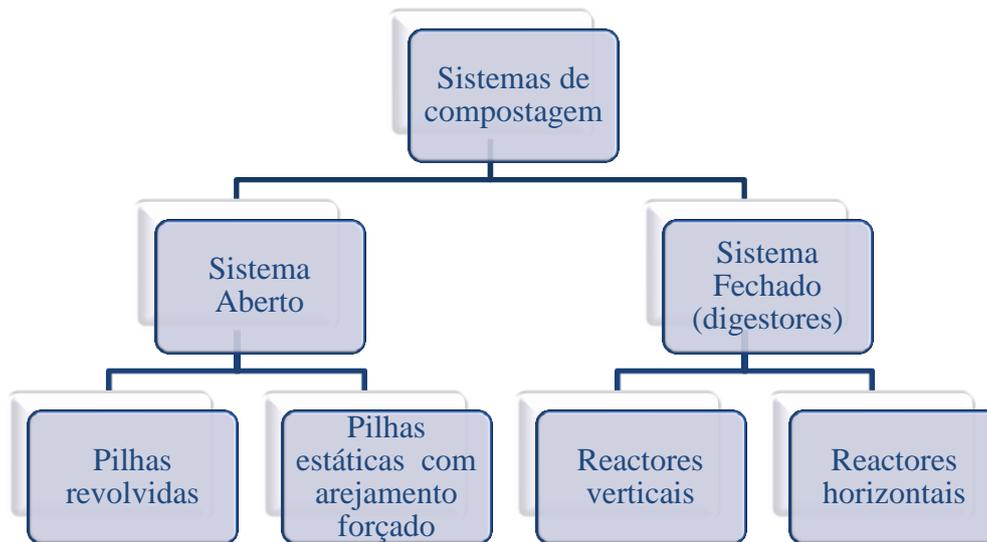


Figura 2.2 – Classificação dos Sistemas de Compostagem.

2.3.1. Sistemas Abertos

Nos sistemas abertos, o processo de compostagem decorre sem que exista uma fronteira, isto é, em áreas livres, e torna geralmente a configuração de pilhas revolvidas ou pilhas estáticas com arejamento forçado.

Nas pilhas revolvidas à escala industrial, o arejamento do material é realizado através de revolvimentos por acção mecânica, que revolvem o material e formam uma nova pilha. No caso de pilhas de pequenas dimensões, o revolvimento pode ser realizado manualmente. O revolvimento promove a transferência de oxigénio necessária para suportar a actividade microbiana aeróbia.

Nas pilhas estáticas com arejamento forçado, o material é colocado na forma de pilha, sendo importante que exista porosidade suficiente entre as partículas, para que ocorra a circulação de ar.

Este tipo de sistemas oferece vantagens, nomeadamente a simplicidade do projecto e de operação, maior flexibilidade do sistema e menores custos operativos envolvidos.

Quanto às desvantagens, destacam-se a necessidade de grandes áreas para a sua realização, a possibilidade de existir a produção e libertação de odores e lixiviados, e por fim, o facto de o processo estar condicionado pelas condições climáticas (Russo, 2003; Moura, 2007).

2.3.2. Sistemas Fechados

Nos sistemas fechados, como o próprio nome indica, o processo de compostagem decorre em ambiente fechado, podendo ser em reactores verticais ou horizontais. Os reactores verticais podem ser contínuos ou descontínuos. Já os reactores descontínuos estão divididos em estáticos ou rotativos.

Como vantagens, este tipo de sistemas permite controlar os diversos parâmetros, pois, os reactores estão equipados com sistemas de revolvimento e de controlo de arejamento; o espaço requerido é menor; as condições ambientais não afectam o processo; não apresenta problemas de libertação de odores e há um maior controlo da actividade microbiana. Relativamente às desvantagens, destacam-se os elevados custos de investimento, quer ao nível operacional, quer ao nível de manutenção (Russo, 2003; Moura, 2007).

2.4. Fases determinantes para o processo

Num processo de compostagem, é necessário ter presente alguns factores que são determinantes para o seu bom funcionamento, de forma a obter um produto final (composto) com um grau de estabilização que possa ser aplicado como correctivo de solos.

2.4.1. Fases do processo

As fases do processo de compostagem em modo descontínuo são apresentadas como uma sequência de etapas que evoluem continuamente no decorrer do tempo. A Figura 2.3 apresenta a sequência de etapas que devem observar-se no decorrer do processo de compostagem.

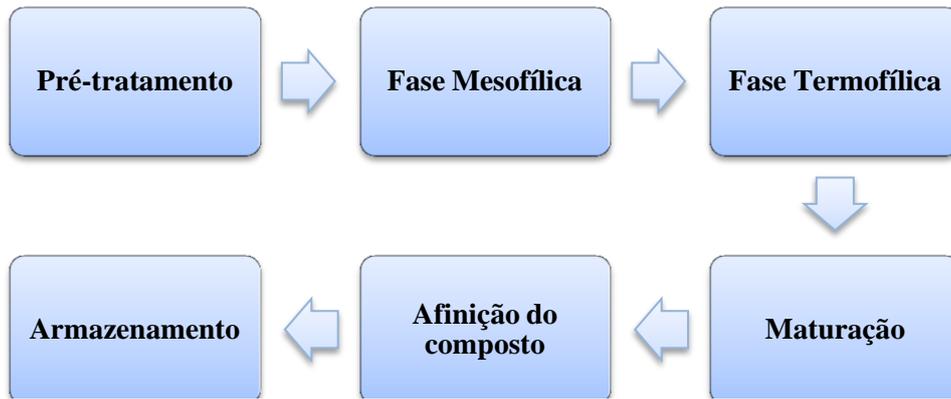


Figura 2.3 – Esquema representativo das fases no processo de compostagem.

Inicialmente, os resíduos orgânicos devem ser submetidos a um pré-tratamento onde as dimensões das partículas devem ser ajustadas e os possíveis contaminantes removidos.

Após o pré-tratamento, o processo de compostagem inicia-se com a fase mesofílica, em que a oxidação ocorre por acção de microrganismos mesofílicos, constituídos por bactérias e fungos. As substâncias simples, como por exemplo, os glícidos de baixo peso molecular, começam a ser convertidos em ácidos orgânicos de baixo peso molecular, que levam a uma diminuição do pH da mistura para uma gama de valores de 4,5 – 6,0. A fase mesofílica tem uma duração curta, podendo a temperatura do sistema atingir valores de aproximadamente 40 °C (Trautmann e Krasny, 1997; Moura 2007).

Quando a temperatura da mistura ultrapassa os 40 °C, os microrganismos mesofílicos começam a ser substituídos por microrganismos termofílicos, que são constituídos por bactérias termofílicas, *actinomyces* e fungos, iniciando-se a fase termofílica. Nesta fase, dá-se a degradação de macromoléculas, tais como as proteínas, gorduras e carboidratos complexos como a celulose e a hemicelulose. A temperatura máxima, nesta fase, não deve exceder 65-70 °C para evitar a morte de microrganismos necessários à degradação das macromoléculas (Trautmann e Krasny, 1997). O pH também sofre um aumento para uma gama de valores de 5.5 – 8.5, durante a degradação da matéria orgânica, devido à metabolização dos ácidos orgânicos formados inicialmente. Nesta fase, ocorre a eliminação de sementes de ervas daninhas, larvas e microrganismos patogénicos termosensíveis. (Trautmann e Krasny, 1997; Cornell Composting).

Quando a matéria orgânica biodegradável começa a diminuir, também a temperatura da mistura diminui gradualmente, até que os microrganismos mesofílicos

surtem novamente. Embora nesta fase do processo de compostagem, a temperatura esteja próxima da temperatura ambiente, as reacções químicas continuam de modo que a matéria orgânica se torne cada vez mais estável. Assim, o material torna-se escuro, amorfo com aspecto de húmus e com odor a terra húmida (Trautmann e Krasny, 1997; Russo 2003).

No final, o composto é processado e eventualmente armazenado até a sua aplicação.

A Figura 2.4 mostra um perfil de temperatura típico num processo de compostagem descontínuo, onde se indicam as diferentes fases do processo acima descritas.

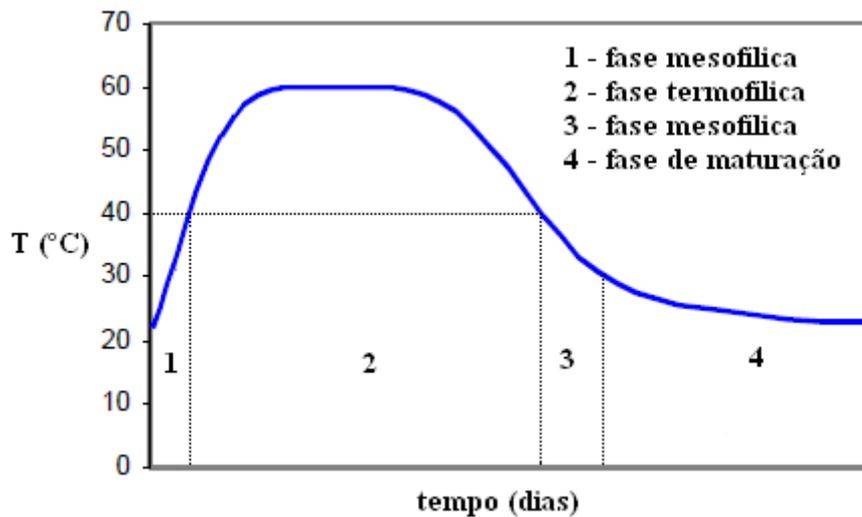


Figura 2.4 – Evolução da temperatura num processo de compostagem (Moura, 2007).

2.4.2. Factores que afectam o processo

Diversos factores processuais são determinantes para a qualidade do produto final obtido. Neste âmbito, os mais importantes são a granulometria do material, o teor de humidade, o arejamento, a temperatura, o pH do material, a razão carbono azoto (C/N) e o volume do sistema.

Granulometria do material

A granulometria do material é um factor fundamental dado que a actividade dos organismos ocorre à superfície das partículas. Assim, quanto menores forem as partículas maiores serão as áreas de contacto e de velocidade de degradação. De facto, é recomendado que seja realizado um tratamento mecânico dos materiais com a finalidade de reduzir a dimensão das partículas.

Todavia, se as partículas apresentarem tamanho demasiado pequeno, ocorre compactação do material, dificultando a circulação de ar, e podendo existir zonas de anaerobiose.

Geralmente, considera-se que uma distribuição de tamanhos das partículas adequada se situa entre 25 – 50 mm (Russo, 2003).

Teor de humidade

A água é indispensável para o desenvolvimento dos microrganismos e para a sua manutenção celular, uma vez que permite o transporte de nutrientes das partículas compostagem para o interior dos microrganismos.

Valores iniciais de humidade de 50 a 60 % são geralmente considerados óptimos para o processo. Na prática, se o teor de humidade for inferior a 35 – 40 %, a taxa de decomposição será reduzida. Para valores abaixo de 30 %, a decomposição de matéria orgânica diminui devido à inibição da actividade microbiana. Por outro lado, se a humidade for superior a 65 %, a água poderá preencher os espaços vazios, dificultando a passagem de oxigénio nesses espaços, conduzindo a condições de anaerobiose e à produção de lixiviados (Trautmann e Krasny, 1997).

O teor de humidade do material a compostar constituído por n materiais distintos, $H_{mistura}$, pode ser determinado a partir da seguinte expressão:

$$H_{mistura}(\%) = \frac{(m_1 \times H_1) + (m_2 \times H_2) + \dots + (m_n \times H_n)}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (2.1)$$

onde H_n é o teor de humidade (%) do material n ; m_n é a massa do material n (kg) e $H_{mistura}$ é o teor de humidade da mistura total, em termos percentuais.

Arejamento

A compostagem é um processo aeróbio e, como tal, é necessário promover o arejamento necessário para fomentar o desenvolvimento dos microrganismos aeróbios. Tal como foi referido anteriormente, na ausência de oxigénio, haverá libertação de odores desagradáveis devido ao sulfeto de hidrogénio (odor característico dos ovos podres) e o amoníaco.

A taxa de arejamento é frequentemente utilizada como variável de controlo no processo de compostagem, devendo a concentração de oxigénio ser maior do que 10 %

(V/V). No entanto, na literatura há referência a gamas de 15 a 20 % de modo a garantir a quantidade de oxigénio necessária. (Bernal *et al.*, 2009).

Temperatura

A temperatura é uma variável fundamental no processo de compostagem, pois permite avaliar a evolução da actividade microbiana no decorrer do tempo. De facto, a temperatura observada traduz o balanço entre o calor libertado por reacção e o calor dissipado para o exterior. O calor perdido durante o processo depende da taxa de arejamento e o nível de isolamento do sistema.

O perfil da temperatura influencia as velocidades de reacção e, conseqüentemente, a qualidade do produto final obtido. Acima de 65 °C a actividade microbiana pode diminuir, uma vez que os microrganismos começam a ser destruídos (Bernal *et al.* 2009).

pH do material

O pH da mistura inicial pode variar dentro da gama de valores de 3 - 11, sendo que a sua gama óptima se encontra próximo da neutralidade, visto que é a gama que melhor se adapta à vida dos microrganismos. Contudo, o valor de pH varia ao longo do processo de compostagem consoante a fase em que se encontra.

O processo inicia-se com valor de pH que pode atingir o valor de 4,5 devido à formação de ácidos orgânicos. No decorrer do processo, verifica-se um aumento progressivo do valor de pH chegando a atingir, no final do processo, valores entre 7 e 8,5. Todavia, se o sistema se tornar anaeróbio, o valor de pH chega a atingir valores inferiores a 4,5, o que limita a actividade microbiana. Caso isto se verifique, o arejamento é em geral suficiente para que o valor de pH volte a subir para a gama de valores aceitáveis (Russo, 2003; Moura, 2007).

Razão C/N

A razão carbono/azoto (C/N), é determinante uma vez que o carbono e azoto são essenciais para o desenvolvimento dos microrganismos. O carbono é o elemento que é utilizado como fonte de energia para a actividade microbiana. O azoto é essencial na síntese de proteínas, fundamentais para o crescimento e funcionamento celular dos microrganismos (Martins, 2007).

Como requisito base para um desenvolvimento adequado dos microrganismos, a razão C/N deve ser 30:1, tendo em conta que os microrganismos utilizam cerca de trinta vezes mais carbono do que o azoto. Contudo, este valor poderá variar consoante a disponibilidade biológica dos elementos referidos.

Se a quantidade de carbono for baixa, a razão C/N é baixa vão surgir dificuldades no aquecimento do sistema de compostagem. Por outro lado, se a quantidade de azoto for elevada, a razão C/N será baixa, podendo ocorrer aquecimento excessivo, destruindo assim os microrganismos e, ocorrendo a libertação de azoto na forma de amónia, provocando um odor desagradável (Trautmann e Krasny, 1997).

Ao longo do processo a razão C/N tende a diminuir, dado que o carbono se consome mais rapidamente que o azoto (Trautmann e Krasny, 1997; Moura 2007).

Volume do sistema

O volume de material pode ter grande influência na velocidade de degradação do material, dado que determina a quantidade de calor trocado com o exterior.

Assim, se o volume for muito pequeno, o sistema apresentará temperaturas baixas, uma vez que o calor resultante da actividade microbiana é dissipado para o exterior. Por outro lado, se volume do material for grande, o material compactar-se-á, podendo o material aquecer demasiado e levar à destruição dos microrganismos.

2.4.3. Materiais usados no processo

Num processo de compostagem recomenda-se que sejam usados materiais orgânicos de origem biológica, descartando os resíduos orgânicos de origem química, como os plásticos. Dada a variedade de matérias-primas possíveis de integrar no processo de compostagem é conveniente classificar os materiais orgânicos a utilizar no processo de compostagem (Santos, 2001). Assim, é frequente dividir os materiais orgânicos em dois grupos: materiais verdes e materiais castanhos. Os materiais verdes são ricos em azoto e possuem um teor de humidade significativo, como por exemplo as aparas de relva, as cascas de fruta e vegetais. Os materiais castanhos são ricos em carbono, e englobam materiais secos como a palha, o feno, a serradura, as aparas de madeira, as folhas secas, entre outros (Compostagem doméstica).

É importante referir que existem materiais orgânicos a evitar no processo de compostagem. Nomeadamente, os restos de comida, plásticos, óleos, entre outros. Deve

sempre evitar-se adicionar materiais que apresentem excesso de gorduras, pois são de difícil biodegradação, libertando ácidos gordos que prejudicam o processo (Trautmann e Krasny, 1997; Martins, 1997).

2.5. Avaliação da estabilidade do composto

A estabilidade é um parâmetro importante para avaliar a qualidade de um composto final, e dá a percepção do grau de decomposição do material biodegradável (Gómez *et al.*, 2005).

Normalmente, o composto é definido como sendo um material que foi estabilizado aerobiamente, podendo ser aplicado directamente no solo de modo a melhorar o crescimento das plantas. Contudo, para que o composto final possa ser utilizado, terá que possuir características adequadas ao nível da estabilidade, caso contrário pode ser prejudicial ao crescimento das plantas.

Os métodos que permitem avaliar a qualidade dos compostos orgânicos, baseiam-se geralmente em ensaios químicos ou em ensaios biológicos. Estes métodos incluem a razão C/N, o conteúdo de substâncias húmicas e o seu grau de polimerização, o teor de polissacarídeos, a actividade respiratória, e a produção de calor (Martins, 2007).

Deve-se notar que, após o processo, o composto apresenta uma tonalidade castanha escura, amorfo com aspecto de húmus e com odor a terra húmida (Komilis e Tziouvaras, 2008).

No processo de compostagem é comum utilizarem-se testes de respirometria para avaliar a estabilidade do composto. Nestes testes, avalia-se a taxa de consumo de oxigénio na actividade dos microrganismos. Um composto que apresente um baixo grau de estabilidade resulta geralmente num elevado consumo de oxigénio.

Os testes de respirometria podem ser realizados directamente no composto ou em extractos líquidos obtidos a partir do mesmo.

A taxa específica de oxigénio, *Oxygen Uptake Rate* – OUR, é um parâmetro respirométrico que quantifica a actividade biológica, que é determinado através da diferença da concentração de oxigénio à entrada e saída do reactor, isto é, o seu valor é quantificado directamente no composto. A equação (2.2) traduz o cálculo deste parâmetro (Gea *et al.*, 2004):

$$OUR = \frac{Q_v \times ([O_2]_{in} - [O_2]_{out}) \times P \times 32 \times 60}{R \times T_{ar,in} \times VS} \quad (2.2)$$

onde OUR (gO₂/kgVS.h); Q_v é o caudal volumétrico do ar à entrada dos reactores (L/min); [O₂]_{in} é a percentagem molar de oxigénio à entrada dos reactores (%); [O₂]_{out} é a percentagem molar de oxigénio à saída dos reactores (%); P é a pressão atmosférica (atm); R é a constante dos gases perfeitos (0,08206 atm.L/mol.K); VS é a quantidade de sólidos voláteis (kg); 32 é a massa molar do oxigénio (gO₂/molO₂) e 60 é o factor de conversão de minutos a horas.

A taxa específica de consumo de oxigénio, *Specific Oxygen Uptake Rate* - SOUR, é outro parâmetro respirométrico que é determinado através da medição da concentração do oxigénio dissolvido, *Dissolved Oxygen* – DO, numa suspensão aquosa de composto em água ao longo do tempo. Assim, o SOUR baseia-se no consumo de oxigénio dissolvido pelos microrganismos.

Quando a taxa de consumo de oxigénio é baixa, isso indica que a matéria orgânica já foi humificada e o composto se encontra estabilizado (Lasaridi e Stentiford, 1998). A realização do teste consiste numa sequência alternada de saturação da suspensão com oxigénio (arejando a suspensão líquida) e medição do consumo de oxigénio. A fase de saturação de oxigénio tem a duração de vinte minutos e a duração de consumo de oxigénio quinze minutos. Este procedimento deve repetir-se aproximadamente vinte horas. No final, a concentração de oxigénio dissolvido representa-se ao longo do tempo tal como se indica na Figura 2.5 (Lasaridi e Stentiford, 1998).

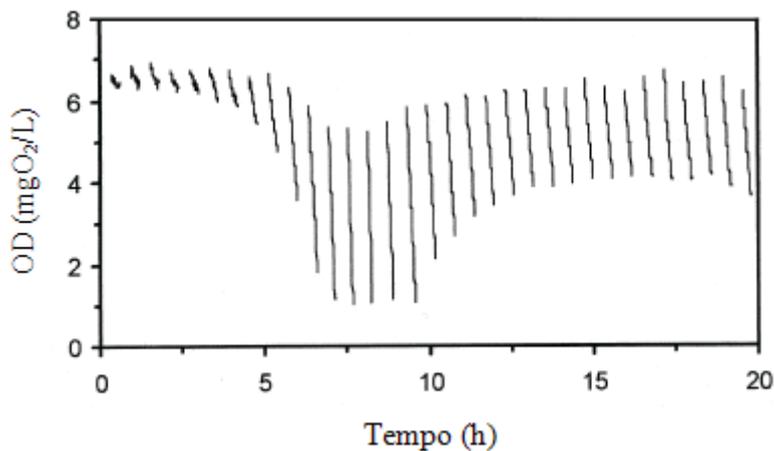


Figura 2.5 – Oxigénio dissolvido em função do tempo num teste de SOUR (Lasaridi e Stentifod, 1998).

Para cada uma das rectas representadas, efectua-se uma regressão linear de forma a determinar o declive das mesmas, $|S|$. O valor de SOUR é determinado pela seguinte expressão:

$$SOUR = \frac{60 \times |S| \times V}{m \times DS \times VS} \quad (2.3)$$

onde, 60 é o factor de conversão de minutos a horas; $|S|$ é o declive de cada uma das rectas da Figura 2.7 ($\text{mgO}_2/\text{L.h}$); V é o volume da suspensão em litros (L); m é a massa do composto em base húmida (g); DS é a fracção de sólidos secos que varia entre 0 e 1; e VS é a fracção dos sólidos voláteis que varia entre 0 e 1 (Lasaridi e Stentiford, 1998). Assim, é possível representar os valores de SOUR obtidos em função do tempo, como mostra a Figura 2.6.

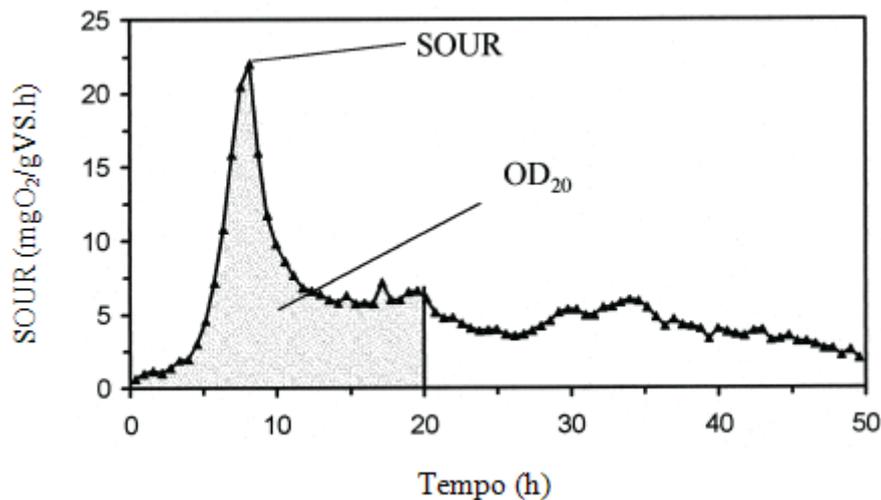


Figura 2.6 - Variação do SOUR ao longo do tempo (Lasaridi e Stentiford, 1998).

Na literatura, considera-se que um composto está estável quando apresenta valores de SOUR inferiores a $1 \text{ mgO}_2/\text{gVS.h}$ (Lasaridi e Stentiford, 1998).

Os testes de respirometria devem ser determinados em condições que favoreçam o desenvolvimento dos microrganismos, pelo que se realizam a $30\text{-}37 \text{ }^\circ\text{C}$. Para além da temperatura, é necessário garantir outros factores, nomeadamente, a presença de nutrientes essenciais à actividade microbiana e a inexistência de substâncias tóxicas (Gómez *et al.*, 2005).

2.6. Instalações laboratoriais para análise do processo de compostagem

Os processos de compostagem têm sido considerados bastante atractivos no que respeita ao tratamento de resíduos sólidos. Actualmente, têm sido desenvolvidos diversos estudos, no sentido de otimizar a sua operação e compreensão dos fenómenos presentes no processo.

Seguidamente, são apresentados dois exemplos de trabalhos de investigação à escala laboratorial, alusivas ao estudo da influência da taxa de arejamento no processo de compostagem.

Barrena *et al.* (2009) efectuaram estudos utilizando resíduos agropecuários, tendo testado diferentes estratégias de controlo processual. A Figura 2.7 mostra uma representação esquemática do tipo de reactor utilizado.

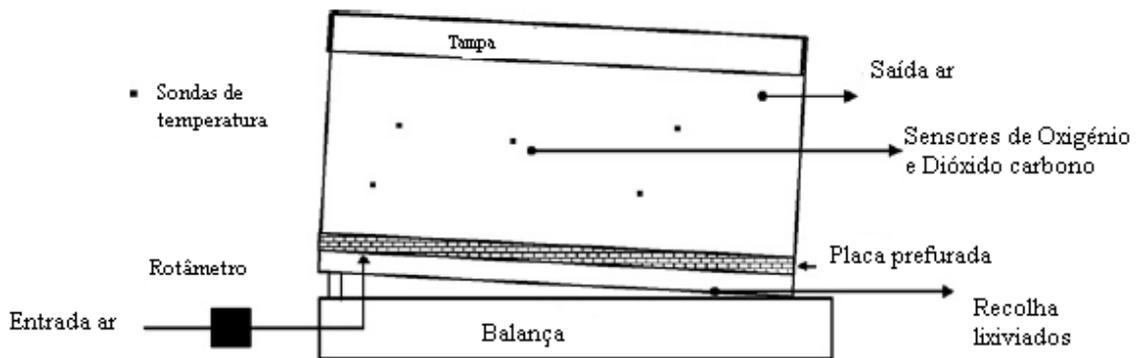


Figura 2.7– Representação esquemática do equipamento utilizado no estudo (adaptado de Barrena *et al.*, 2009).

A investigação envolveu quatro ensaios de controlo para definir gamas de concentração de oxigénio capazes de assegurar as condições aeróbias, e para controlar a temperatura e a concentração de oxigénio através da regulação do caudal de ar à entrada do reactor.

Como principais conclusões, os investigadores referem que são necessárias medidas para que não haja grandes variações de temperatura, uma vez que podem interferir com a higienização do material e que é imprescindível a determinação de índices de actividade biológica.

Bari e Koenig (2001) estudaram o efeito do sentido do caudal de ar no processo de compostagem, testando diferentes sentidos de arejamento, isto é, sentido ascendente, descendente e os dois sentidos alternadamente. Neste âmbito, estudaram também, o efeito da recirculação de ar no processo. A Figura 2.8 apresenta o sistema utilizado pelos investigadores nestes estudos.

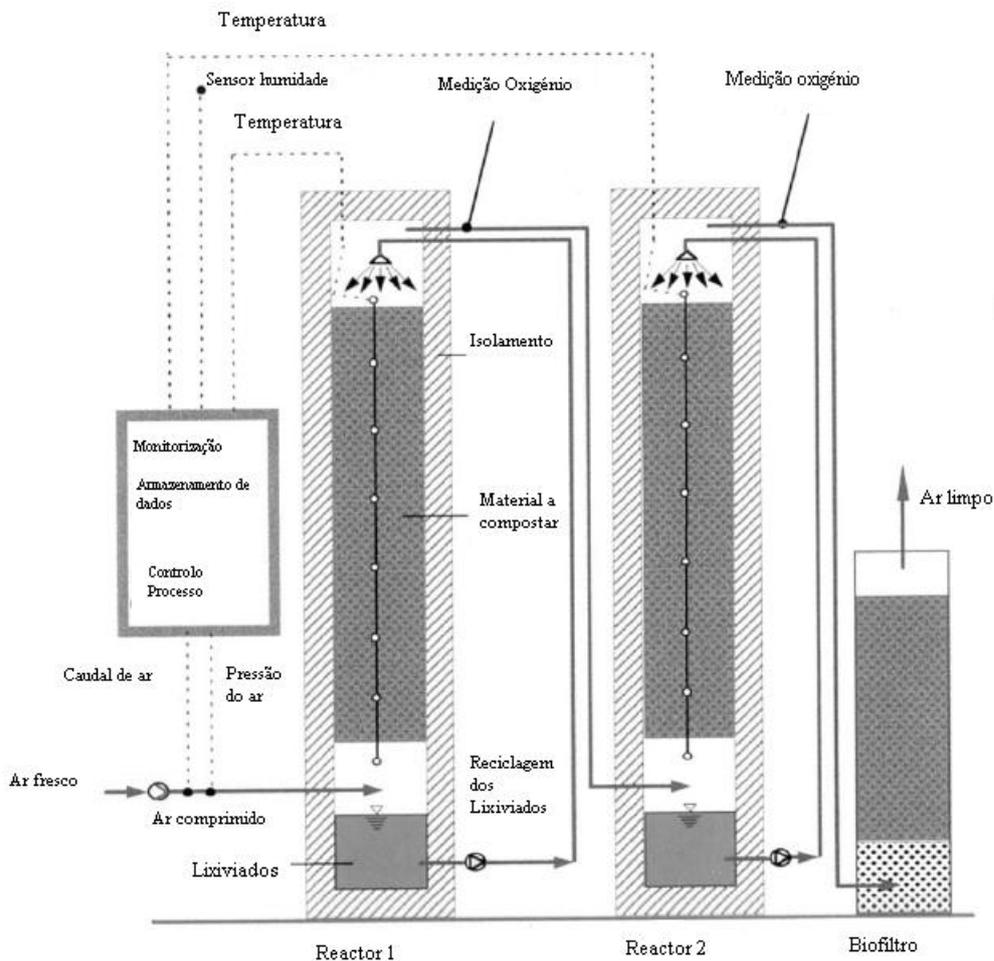


Figura 2.8 – Representação esquemática do sistema de compostagem utilizado (adaptado de Bari e Koenig 2001).

O estudo envolveu a realização de diversos testes em que foram avaliados vários parâmetros que são influenciados pelo caudal de arejamento tais como: a temperatura, teor de humidade, matéria orgânica e o consumo de oxigênio.

As principais conclusões do estudo foram o facto de a aplicação unidireccional dos caudais de ar originar distribuições significativas de temperatura no composto, existindo uma maior estabilidade do composto produzido num sistema de dois reactores do que num só reactor para o mesmo tempo de compostagem. Por outro lado, através da recirculação interna de ar obtém-se uma melhor distribuição do calor em todo o material, originando uma melhor eficiência na degradação da matéria orgânica.

2.7.Estado da arte

Para a realização do trabalho, foi necessário identificar bem a melhor forma de monitorização dos parâmetros principais, tais como a avaliação da estabilidade e a influência da taxa de arejamento no processo de compostagem.

De acordo com a pesquisa bibliográfica, existe uma grande diversidade de métodos para estudar a influência da taxa de arejamento assim como de métodos respirométricos.

Na Tabela 2.1, encontra-se uma síntese dos estudos considerados mais relevantes para atingir os objectivos deste trabalho.

Tabela 2.1 – Estudos do processo de compostagem à escala laboratorial.

Referência	Objectivos	Parâmetros medidos/quantificados	Conclusões
Adani et al. (2003)	Comparar diferentes métodos de respirometria, tendo em conta a definição de estabilidade biológica	- DRI; - SRI; - SOUR.	Valores de SOUR diferem de OUR e SRI. Valor de SOUR é afectado pela fracção orgânica hidrofílica dissolvida
Ahn et al. (2007)	Efectuar balanços mássicos e energéticos de uma mistura de compostagem com diferentes taxas de arejamento, num sistema de 2 reactores	- Concentração O ₂ ; - Taxa de arejamento; - Matéria Orgânica; - Poder calorífico; - Temperatura; - Humidade.	A temperatura e humidade do material de compostagem oscilou mais no reactor que operava com taxas de arejamento maiores do que no de taxas menores. As necessidades de arejamento são dependentes dos materiais utilizados
Barrena et al. (2010)	Avaliar diferentes métodos respirométricos em diferentes misturas	- Concentração O ₂ ; - Matéria Orgânica; - Teor de Humidade; - OUR _{in situ} ; - DRI.	Os valores de OUR obtidos foram relativamente mais baixos que DRI. A nível caracterização respirométrica, o estrume de porco é um material facilmente biodegradável
Gea et al. (2004)	Avaliar os diferentes índices respirométricos para monitorizar a actividade biológica do processo de compostagem	- Concentração O ₂ saída reactor; - Temperatura; - OUR; - SRI; - RQ.	OUR proporcionou valores de actividade microbiana mais adequados para o processo compostagem. SRI obtido foi baixo devido a limitações difusionais do O ₂ . RQ apresentou pequenas variações ao alterar a temperatura do processo
Gómez et al. (2006)	Avaliar e comparar as metodologias de respirometria disponíveis, para avaliar o composto final.	- SOUR; - OUR; - SRI; - Produção CO ₂ ;	Não existe um método único respirométrico para avaliar a estabilidade do composto, cada método é utilizado consoante um objectivo específico
Guardia et al. (2008)	Estudar a influência da taxa de arejamento e avaliar a cinética de biodegradação.	- Temperatura; - Concentração de O ₂ , CO ₂ e CH ₄ ; - COD; - TC.	Para baixas taxas de arejamento, há um maior consumo de oxigénio, e para elevadas taxas de arejamento, há um menor consumo de oxigénio

Tabela 2.1 – Continuação.

Referência	Objectivos	Parâmetros medidos/quantificados	Conclusões
Kulcu <i>et al.</i> (2004)	Avaliar as necessidades de arejamento durante a compostagem de resíduos agrícola em 4 reactores com arejamento por convecção forçada e 1 com arejamento por convecção natural.	- Temperatura; - Humidade; - Taxa de CO ₂ ; - Taxa de arejamento; - Matéria Orgânica; - pH;	A taxa de arejamento óptima para esta mistura era de 0.4 L _{ar} /min.kgMO. O arejamento por convecção natural leva a uma insuficiência de fornecimento de O ₂ e à acumulação de CO ₂ .
Li <i>et al.</i> (2008)	Estudar os efeitos da taxa de arejamento, avaliar métodos de arejamento (convecção forçada - base e difusão - topo) no processo de compostagem de mistura de estrume de vacas e palha de arroz.	- Temperatura; - Taxa de consumo de O ₂ ; - Quantificar a emissão de gases.	Recomenda-se uma taxa de arejamento de 0.25 l/min.kgVS. Não houve diferença significativa nos métodos de arejamento através de convecção forçada e difusão, em termos de propriedade do composto final.
Pulicino <i>et al.</i> (2007)	Avaliar a estabilização e grau de maturação do composto ao longo do processo de compostagem.	- Concentração de O ₂ dissolvido; - SOUR.	Valores elevados de SOUR indicam a presença de compostos orgânicos que "auxiliam" a respiração microbiana, resultando num elevado consumo de O ₂ .
Puyuelo <i>et al.</i> (2010)	Desenvolver um controlador automático baseado na medição on-line de OUR.	- Temperatura; - OUR; - DRI.	Os controladores permitem que se atinja uma OUR elevada obtendo um composto mais estável.

Ao nível da influência da taxa de arejamento, os estudos realizados por Kulcu *et al.* (2003) e Li *et al.* (2008) fazem uma análise exaustiva sobre como seleccionar o caudal a introduzir no sistema de compostagem, e os estudos Ahn *et al.* (2007), mostram como a taxa de arejamento pode ser usada para realizar o controlo do sistema.

As principais conclusões a este nível são: o modo de arejamento influencia fortemente o processo compostagem e as necessidades de arejamento dependem do tipo de material utilizado na compostagem.

Ao nível dos diversos parâmetros respirométricos, os mesmos podem ser quantificados de diversas formas e medidos directamente no composto ou em extractos líquidos. Estes parâmetros são utilizados para quantificar a actividade microbiana.

Relativamente ao OUR e SOUR, as monitorizações foram indicadas anteriormente (equações (2.2) e (2.3) respectivamente). Segundo Gea *et al.* (2004), o *Dynamic Respiration Index* – DRI, é equivalente ao OUR definido na equação (2.2), uma vez que o seu procedimento de cálculo é o mesmo. O mesmo autor e Adani *et al.* (2003) referem ainda outros parâmetros como o *Static Respirometric Index* – SRI como sendo um parâmetro subestimado da actividade biológica e o parâmetro *Respiratory Quotient* – RQ, cujos valores são determinados pelas equações (2.4) e (2.5) respectivamente.

$$SRI = \frac{V \times P \times 32 \times s \times 60}{R \times T \times X \times VS} \quad (2.4)$$

onde SRI (gO₂/kgVS.h); V é o volume de ar no balão de análise (L); s é o declive da variação da concentração de oxigénio (molO₂/mol.min); X é a massa em base húmida do composto (kg); P é a pressão atmosférica (atm); R é a constante dos gases perfeitos (0,08206 atm.L/mol.K); VS é a quantidade de sólidos voláteis (kg); T é a temperatura (K); 32 é a massa molar do oxigénio (gO₂/molO₂) e 60 é o factor de conversão de minutos a horas.

$$RQ = \frac{[CO_2]_{out}}{20,9 - [O_2]_{out}} \quad (2.5)$$

onde RQ (adimensional); [CO₂]_{out} é a concentração de dióxido de carbono à saída dos reactores (%) e [O₂]_{out} é a concentração de oxigénio à saída dos reactores (%).

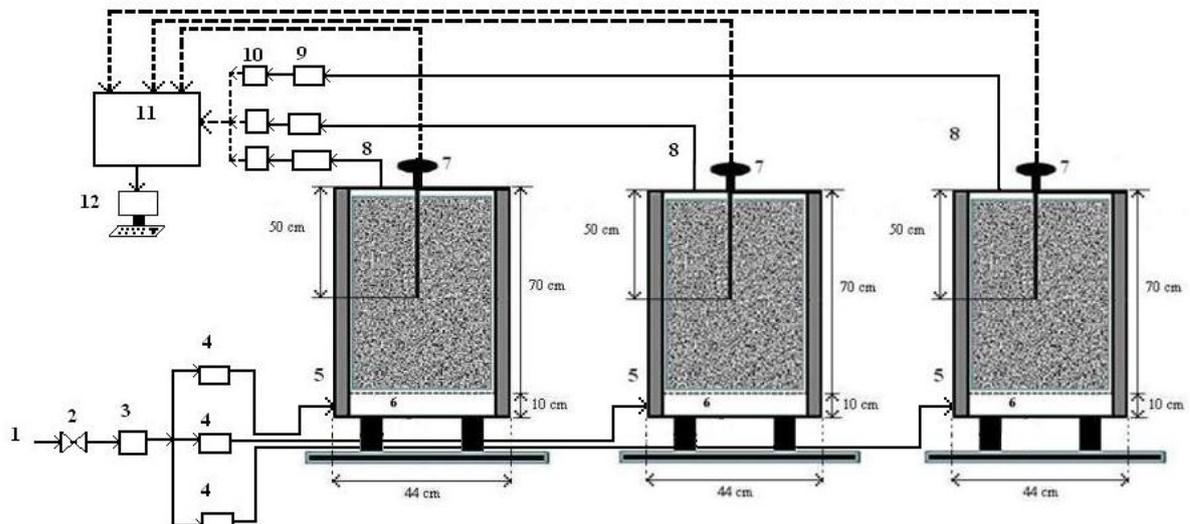
Actualmente o índice mais recomendado é o OUR, parâmetro mais utilizado (Gea *et al.*, 2004) e quantificado no estudo deste trabalho.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo descreve-se a instalação laboratorial utilizada, as condições operatórias, a preparação da mistura, a monitorização realizada ao longo do processo e o plano de amostragem utilizado.

3.1. Descrição da instalação experimental utilizada

A instalação laboratorial utilizada neste trabalho foi representada esquematicamente na Figura 3.1.



Legenda:

- 1 – Entrada de ar comprimido
- 2 – Válvula de caudal
- 3 – Sistema de ajuste da humidade ar
- 4 – Rotâmetro
- 5 – Isolamento térmico
- 6 – Placa perfurada
- 7 – Sonda de temperatura
- 8 – Gases de saída
- 9 – Sistema de recolha de condensados
- 10 – Sondas de concentração de oxigénio
- 11 – Sistema de aquisição de dados
- 12 – Computador

Figura 3.1 – Representação esquemática da instalação experimental.

A referida instalação consiste num sistema de três reactores dispostos em paralelo. Os reactores apresentam geometria cilíndrica e foram isolados termicamente do exterior através de revestimento com uma Manta Aeroflex (cujas características se encontram em Anexo A).

Os reactores têm um orifício lateral, que permite a entrada de ar comprimido, o qual é distribuído através de uma placa de perspex perfurada simetricamente que tem como função distribuir uniformemente o ar pela mistura processual bem como o suporte da mistura colocada no interior do reactor. No topo, os reactores têm dois orifícios, um para introduzir a sonda de temperatura e outra para permitir a saída dos gases libertada ao longo do processo, bem como o ar em excesso. A sonda de temperatura permitiu fazer medições no centro da mistura, sendo possível variar a sua posição à medida que a altura da mistura do reactor foi diminuindo.

3.2. Preparação da mistura

Antes de iniciar o processo de compostagem foi necessário definir os materiais a utilizar. A mistura de compostagem foi preparada com base em três tipos de materiais: palha de trigo, casca de batata e aparas de relva, sendo que as suas proporções foram determinadas com base nas suas composições. A Tabela 3.1 mostra informação relevante acerca dos materiais (teor de humidade, teor de matéria orgânica, razão C/N), bem como da mistura de compostagem (composição e massa total).

Tabela 3.1 – Características do material utilizado para a mistura processual.

Material	Teor de humidade (%)	Teor de matéria orgânica (%)	Razão C/N	Proporção da mistura (%)	Massa no reactor (kg)
Casca de batata	87,9	94	26,7	52	15,6
Aparas de relva	80,5	84	19,4	30	9,0
Palha de trigo	9,0	94	87,9	18	5,2
MISTURA	73,6	91	37,2	100	29,8

Os materiais referidos foram previamente preparados em termos de granulometria e homogeneização antes de serem introduzidos nos reactores. Assim, a palha foi moída de modo a passar através de um crivo de 1 cm de malha e a relva foi crivada através de uma malha de 5 cm.

3.3. Monitorização do processo de compostagem

Para efectuar uma correcta monitorização processual é indispensável conhecer as condições operatórias do processo. Os reactores estavam aproximadamente à pressão atmosférica e o ar comprimido entrava na base do reactor à temperatura ambiente (aproximadamente a 17 °C). Inicialmente, os caudais de arejamento foram mantidos constantes ao longo do tempo, sendo a sua monitorização realizada através de um rotâmetro (cuja curva de calibração se indica no Anexo B).

A Tabela 3.2 apresenta os valores para as taxas de arejamento e respectivos caudais de ar.

Tabela 3.2 – Estimativa de valores para o caudal de arejamento.

Reactor	Taxa arejamento ($L_{ar}/min.kgMO_{inicial}$)	Caudal ar (L_{ar}/min)
1	0,30	2,09
2	0,98	6,62
3	1,59	10,80

A monitorização de cada reactor envolveu os seguintes parâmetros: a temperatura reaccional, a concentração de oxigénio nos gases de saída, o teor de humidade, o teor da matéria orgânica, o pH, a condutividade eléctrica, a razão C/N, a densidade *bulk* e o *Free Air Space* – FAS.

A temperatura reaccional foi monitorizada através de sonda cujas características se encontram no Anexo A, fazendo a aquisição *online* de dados a cada 10 minutos.

A concentração de oxigénio foi monitorizada, através de sonda cujas características se encontram também no Anexo A, fazendo a aquisição *online* de dados a cada 24 horas.

Os restantes parâmetros foram monitorizados de acordo com o plano de amostragem.

3.4. Plano de Amostragem

É extremamente importante garantir que o planeamento de amostragem permita obter amostras representativas ao longo do processo, para que os diversos parâmetros a monitorizar possam ser adequadamente quantificados. Assim, o plano de amostragem deve estabelecer o tipo, a quantidade e a frequência de amostragem, o qual deve estar de acordo com os parâmetros a serem analisados.

No presente estudo, as amostras foram recolhidas após a homogeneização e pesagem dos reactores conforme descrito em Anexo C, sendo que a frequência de amostragem foi de três vezes por semana. Cada amostra foi obtida por um conjunto de três sub-amostras que foram recolhidas de vários pontos aleatórios do reactor. A massa de cada amostra era aproximadamente 500 gramas.

Cada amostra total foi homogeneizada antes de se proceder à análise de diversos parâmetros.

3.4.1. Determinação do teor de humidade

A humidade da mistura foi determinada com base no seguinte procedimento experimental, tendo sido realizadas três réplicas para cada determinação.

Procedimento experimental:

1. Registrar a massa de um copo;
2. Pesar cerca de 20 g amostra de composto;
3. Colocar na estufa a 105 °C, durante 24 horas;
4. Após a secagem, arrefecer no exsiccador até temperatura ambiente e pesar;

A humidade foi calculada pela equação 3.1.

$$H(\%) = \frac{\text{massa amostra húmida} - \text{massa amostra seca}}{\text{massa amostra húmida}} \times 100 \quad (3.1)$$

3.4.2. Determinação do teor da matéria orgânica

A matéria orgânica foi determinada através da calcinação da amostra a uma temperatura definida. Estudos realizados por Andrade (2010) indicaram o valor da temperatura e o tempo mais adequados para a calcinação da mistura em análise.

Procedimento experimental:

1. Pesar 2,5 g base seca de amostra de composto em base seca, previamente moída, num cadinho de porcelana calcinado de massa conhecida;
2. Colocar na mufla durante 4 horas a 550 °C;
3. Deixar arrefecer o cadinho no exsiccador até à temperatura ambiente e pesar;

A matéria orgânica foi calculada pela equação 3.2, realizando sempre três réplicas.

$$MO (\%) = \frac{\text{massa amostra seca} - \text{massa amostra calcinada}}{\text{massa amostra seca}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.4.3. Determinação do pH e da condutividade eléctrica

Para determinar o pH e a condutividade eléctrica recorreu-se a eléctrodos específicos para o efeito, usando extractos aquosos obtidos, de acordo com EN 13037:1999 e EN 13038:1999 respectivamente.

Para a determinação destes parâmetros foram realizadas duas réplicas.

Procedimento experimental para medição de pH:

1. Pesar uma quantidade de amostra equivalente a 60 ml de volume, estimada a partir da densidade *bulk* da amostra;
2. Adicionar 300 ml de água destilada;
3. Fechar o frasco e agitar a suspensão num agitador durante 1 hora a rotação constante;
4. Efectuar a medição de pH no respectivo equipamento, após sua calibração (conforme as instruções do fabricante).

Procedimento experimental para a medição da condutividade eléctrica:

1. Pesar uma quantidade de amostra equivalente a 60 ml de volume, estimada a partir da densidade *bulk* da amostra;
2. Adicionar 300 ml de água destilada;
3. Fechar o frasco e agitar a suspensão num agitador durante 1 hora a rotação constante;
4. Filtrar a suspensão utilizando sistema de vácuo para obter um sobrenadante mais límpido;
5. Recolher o filtrado;
6. Efectuar a medição de condutividade eléctrica no respectivo equipamento, após sua calibração (conforme as instruções do fabricante).

3.4.4. Determinação do carbono orgânico

A determinação do carbono orgânico foi quantificada por oxidação do CO₂ à temperatura de 550 °C, usando o equipamento *LECO – Model SC 144DR*. Para tal, pesou-se 2,5 g de amostra do composto em base seca, previamente moída colocando de seguida no equipamento durante 2 minutos. Para a determinação deste parâmetro foram realizadas duas réplicas.

3.4.5. Determinação do azoto pelo método de Kjeldhal

O método de Kjeldhal permite determinar o azoto na forma de amónia, nitritos, nitratos e compostos orgânicos presentes numa amostra.

O teor de azoto, presente na amostra, é determinado usando um método compreendido em três fases:

- A digestão da amostra em análise com ácido sulfúrico, na presença de uma mistura catalítica;
- A destilação do azoto amoniacal formado na digestão, depois de libertado em meio alcalino e recolha do destilado em ácido bórico;
- A titulação do destilado com uma solução de ácido clorídrico de concentração conhecida.

A análise ao parâmetro referida foi realizada de acordo com a norma EN 13039:1999. Para a determinação deste parâmetro foram realizadas duas réplicas.

3.4.6. Determinação da densidade *bulk*

A densidade *bulk* foi determinada de acordo com as metodologias descritas em *Test Methods of the Examination of Composting and Compost – TMECC*.

Para a determinação deste parâmetro foram realizadas três réplicas.

Procedimento experimental:

1. Pesar e registar a tara de uma proveta de 2000 ml;
2. Transferir uma alíquota de 600 ml de composto para a proveta;
3. Para garantir que o composto fique distribuído, uniformemente, na proveta, eleva-se esta até uma altura de 15 cm, e deixa-se cair livremente sobre um suporte adequado;
4. Repete-se duas vezes os passos 2 e 3, para prefazer o volume de 1800 ml.
5. Pesar a proveta e registar o seu valor.

A densidade *bulk* foi calculada pela equação (3.3).

$$\text{Densidade Bulk} = \frac{\text{massa amostra húmida correspondente a 1800 ml}}{\text{volume final de composto na proveta (1800 ml)}} \quad (3.3)$$

3.4.7. Determinação do *free air space*

O *free air space* foi calculado com base em outras determinações analíticas que fazem parte do plano de monitorização do processo tal como a densidade *bulk*.

A determinação do *free air space* foi efectuada na expressão empírica, de acordo com Ruggieri *et al.* (2009):

$$FAS = 1 - DB \left[\frac{1 - MS}{\rho_{H_2O}} + \frac{MS \times MO}{\rho_p} + \frac{MS(1 - MO)}{\rho_c} \right] \quad (3.4)$$

onde, DB é a densidade *bulk*; MS é a fracção de matéria seca; MO é o teor de matéria orgânica (%); ρ_{H_2O} é a massa volúmica da água (1000 kg/m^3); ρ_p é a massa volúmica das partículas (2500 kg/m^3) e ρ_c é a massa volúmica das cinzas (1600 kg/m^3).

Para a determinação deste parâmetro foram realizadas três réplicas.

3.4.8. Determinação do SOUR

A determinação do *Specific Oxygen Uptake Rate* - SOUR foi realizada através de testes de respirometria, recorrendo ao equipamento apresentado na Figura 3.2. Para a determinação deste parâmetro foi realizada apenas uma réplica.

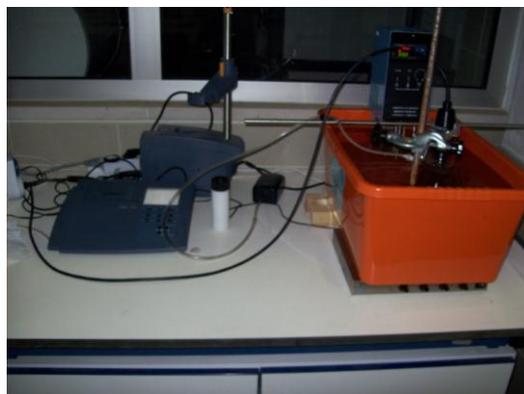


Figura 3.2 – Instalação utilizada no laboratório para teste de respirometria.

Procedimento experimental (Lasaridi e Stentiford, 1998):

1. Preparar um banho à temperatura constante de 30°C ;
2. Pesar 20 g de amostra de composto (base húmida);
3. Colocar a massa de amostra num misturador com 2 litros de água destilada, previamente arejada, 60 ml de solução tampão fosfatos (solução constituída por KH_2PO_4 , K_2HPO_4 , $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e NH_4Cl) e 20 ml de cada uma das soluções: CaCl_2 , FeCl_3 e MgSO_4 (conforme o procedimento standard do teste de Carência Bioquímica Oxigénio que se encontra em Anexo D);
4. Levar a agitação durante 30 segundos;
5. Decantar a suspensão, transferindo para o reactor cerca de 1 litro, e, posteriormente, colocar no banho;
6. Calibrar o equipamento;
7. Arejar a solução durante 15 minutos e, posteriormente, efectuar a medição da concentração de oxigénio durante 15 minutos no equipamento já calibrado;

8. Após 15 minutos de medição, voltar a arejar a solução durante 15 minutos;
9. O procedimento repete-se sucessivamente, durante o tempo necessário.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Como foi referido anteriormente, o principal objectivo do trabalho foi consolidar o processo de compostagem à escala laboratorial, a fim de avaliar a influência da taxa de arejamento na actividade microbiana ao longo do processo.

Este capítulo encontra-se dividido em três secções onde se discute a evolução dos parâmetros monitorizados, a análise dos gradientes espaciais de temperatura e a avaliação de estabilidade do composto.

4.1. Monitorização do processo de compostagem

Os ensaios de compostagem realizados envolveram a monitorização de diversos parâmetros tais como: a temperatura, concentração de oxigénio na corrente de saída, caudal de arejamento, teor de humidade, teor de matéria orgânica, pH, condutividade eléctrica, razão C/N, densidade *bulk* e *free air space*.

A instalação experimental utilizada foi anteriormente indicada na Figura 3.1 e a mistura processual foi preparada de acordo com o descrito no capítulo 3. O início do processo (tempo zero) coincidiu com a abertura da válvula de ar comprimido.

4.1.1. Monitorização da temperatura

A monitorização da temperatura foi realizada através de uma sonda (termopar tipo K) localizada no centro geométrico de cada reactor e outra sonda no exterior dos reactores de forma a registar a temperatura ambiente.

A Figura 4.1 mostra a evolução da temperatura da mistura de compostagem ao longo do tempo para cada reactor. Deve salientar-se que este conjunto de experiências se reporta à mesma mistura inicial a qual foi indicada na Tabela 3.1. As diferenças observadas resultam do facto de o caudal de ar ser diferente em cada caso.

Para o reactor 1, o caudal de ar usado foi de 2,09 L/min, para o reactor 2 de 6,62 L/min e para o reactor 3 de 10,80 L/min.

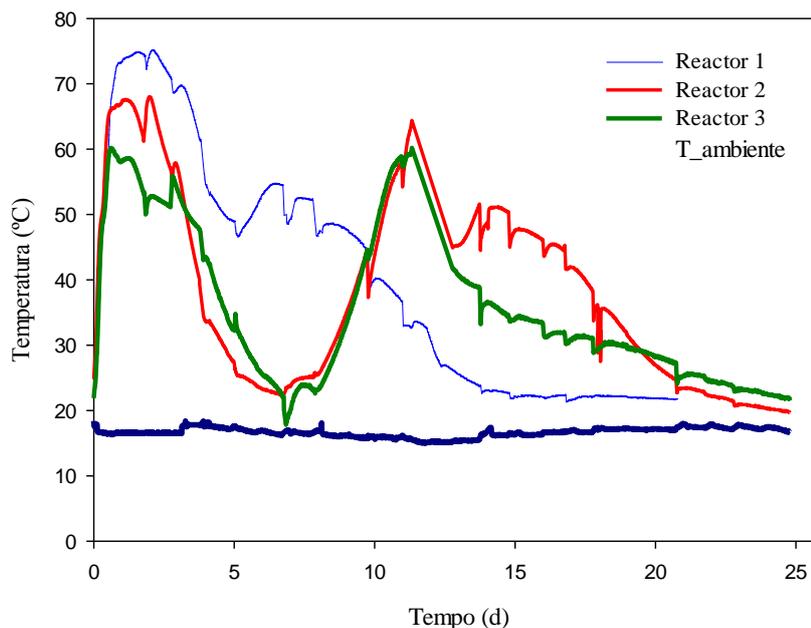


Figura 4.1 – Evolução temporal da temperatura nos três reatores.

Analisando os perfis de temperatura ilustrados na Figura 4.1, verifica-se um aumento acentuado de temperatura nos primeiros dois dias, atingindo valores máximos de 75,3; 68 e 60,2 °C para os reatores 1, 2 e 3, respectivamente. Estes valores permaneceram aproximadamente constantes algumas horas, findo esse tempo, a temperatura diminuiu gradualmente.

No 6º dia do processo houve a necessidade de interferir nos caudais de ar inicialmente estabelecidos para os reatores 2 e 3. Na prática, os respectivos valores de caudal de ar foram alterados para caudais iguais ao reactor 1. Por outras palavras, a partir do 6º dia os três reatores operavam com igual valor de caudal de ar. Esta acção foi realizada porque os reatores 2 e 3 se encontravam num regime operativo que obrigava o sistema a uma fase mesofílica, em que temperaturas atingiram valores inferiores a 22 e 20 °C respectivamente. Como resposta do sistema à correcção tomada, as temperaturas dos reatores voltaram a aumentar atingindo novamente a fase termofílica.

Tendo em conta que a fase termofílica ocorre para valores superiores a 40°C (Trautmann e Krasny, 1997), podendo ser verificado nos três reatores, comprova-se que os microrganismos patogénicos foram eliminados, não estando em risco a higienização do material.

O reactor 1, no qual o caudal de ar se manteve constante, atingiu a fase mesofílica no 10º dia, tendo-se considerado que o processo de compostagem estava

praticamente finalizado no 21º dia com temperatura de 21,9 °C. Os reactores 2 e 3 tiveram um comportamento “anómalo” pelas razões atrás indicadas. A monitorização destes dois reactores teve a duração de 25 dias.

Tal como foi referido anteriormente, a homogeneização das misturas reaccionais foi realizada diariamente através do revolvimento dos reactores. Em geral, por cada vez que se realizou esta acção, a mistura reaccional “reagiu” com um aumento de temperatura. Este facto resultava da homogeneização da mistura, dado que os perfis de temperatura no interior dos reactores podiam ser significativos. Este facto será analisado com maior detalhe posteriormente.

4.1.2. Monitorização do caudal de arejamento

O arejamento foi efectuado através de uma ligação entre a linha de ar comprimido, existente no laboratório, e as bases respectivas dos reactores. A quantificação dos caudais de ar foi realizada através de rotâmetros. Estes medidores foram calibrados com recurso a um medidor de bolha construído para o efeito e ilustrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 - Medidor do caudal de ar (medidor de bolha).

Com base na literatura consultada foi considerado que o caudal de ar devia estar na gama de 0,43 a 0,86 L/min.kgVS (Ahn *et al.*, 2007).

Assim, para o trabalho laboratorial estabeleceu-se que os valores iniciais dos caudais de ar para os reactores 1, 2 e 3, seriam 2,09; 6,62 e 10,80 L/min respectivamente (equivalente a 0,30; 0,98 e 1,59 L/min.kgVS pela ordem indicada).

Sendo um dos objectivo do trabalho estudar a influência do caudal de arejamento na actividade microbiana do processo, analisou-se a interferência deste parâmetro na temperatura. A Figura 4.3 (a) mostra a evolução da temperatura e o caudal de ar no reactor 1 e a Figura 4.3 (b) ilustra as mesmas variáveis mas observadas nos reactores 2 e 3.

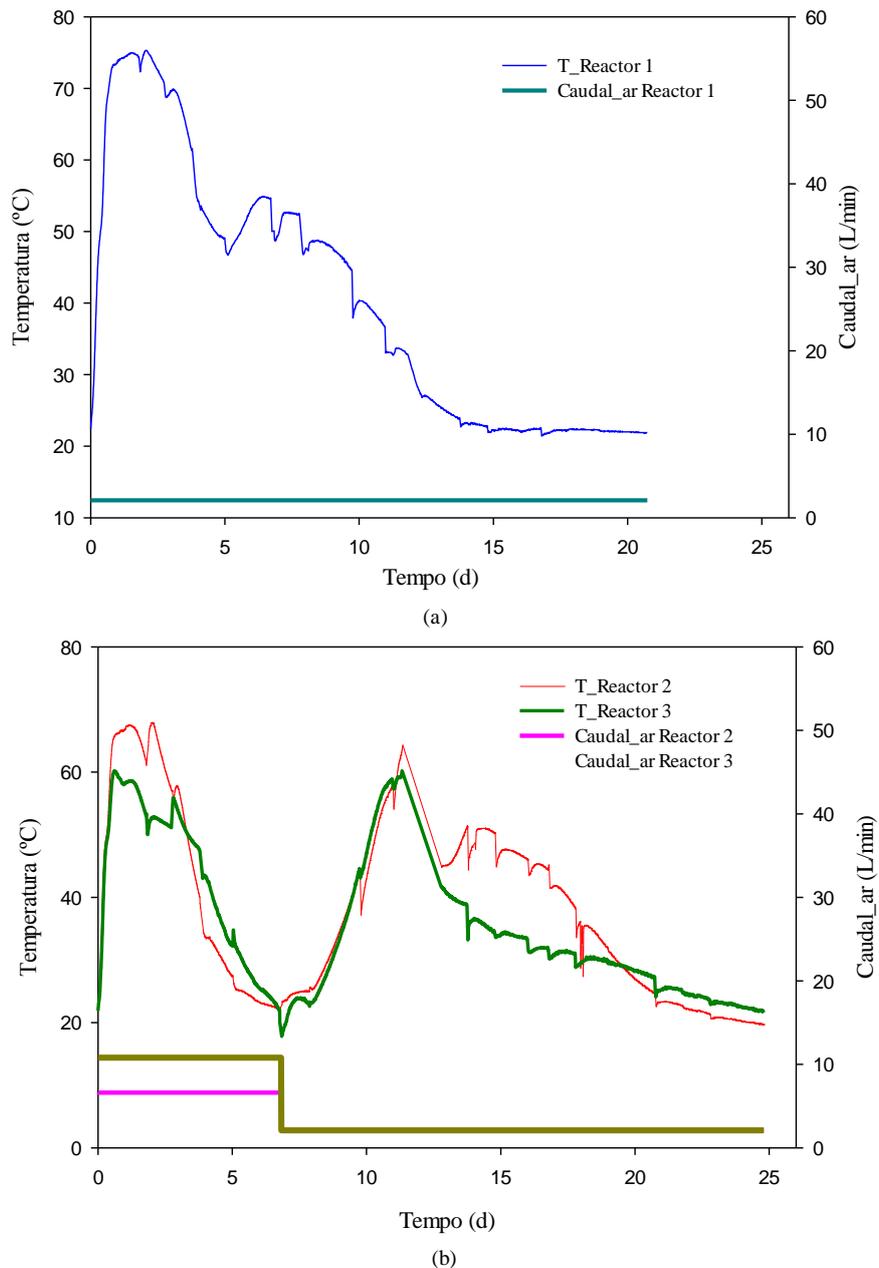


Figura 4.3 – Influência da taxa de arejamento na temperatura: (a) reactor 1; (b) reactores 2 e 3.

A Figura 4.3 permite verificar que mesmo quando o caudal de arejamento permanece constante ao longo do processo de compostagem, a evolução da temperatura rapidamente atinge a fase termofílica, a qual tem a duração de cerca de 10 dias. Depois deste período, o sistema entra na fase mesofílica até que a temperatura se aproxima da temperatura ambiente.

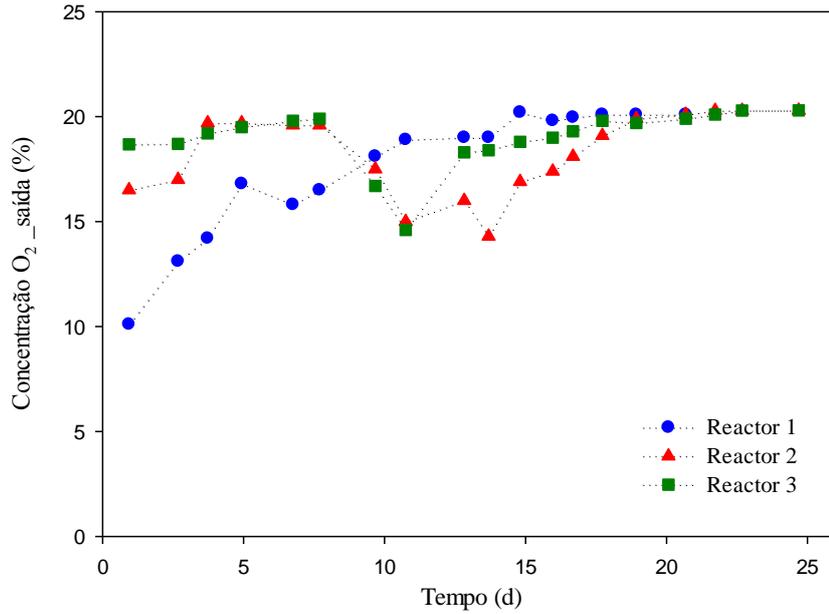
No que respeita aos reactores 2 e 3 observou-se que o caudal de ar influencia fortemente a temperatura, dado que remove o calor para o exterior. No 6º dia de processo, foi necessária a intervenção no sistema, diminuindo os caudais de ar. Após esta alteração, os processos retomam a fase termofílica, a qual é determinante para garantir a higienização dos materiais usados.

Para analisar a influência do caudal de ar na actividade microbiana que decorre no processo de compostagem, quantificou-se a sua actividade através da taxa específica de oxigénio, *Oxygen Uptake Rate* - OUR conforme descrito no capítulo 2.

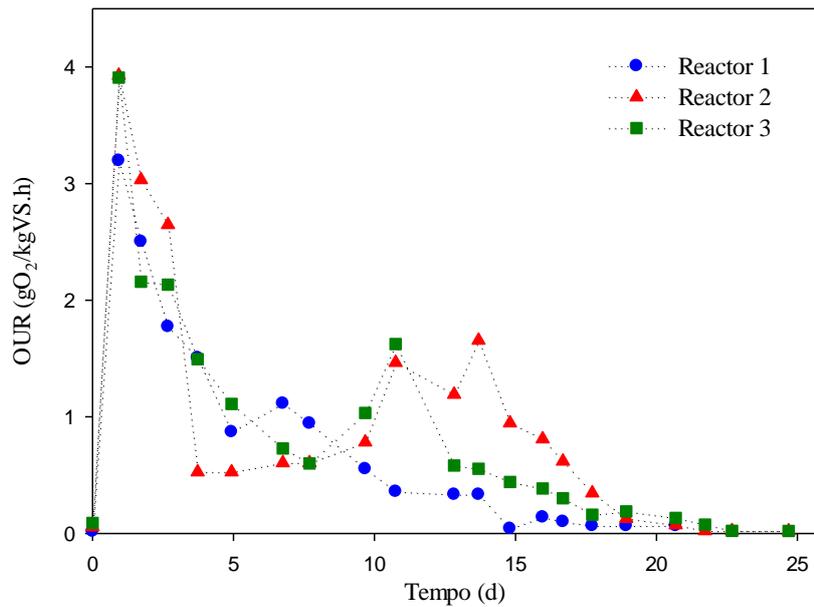
O cálculo de OUR requiere que se conheçam as concentrações de oxigénio à entrada e à saída dos reactores.

As sondas usadas para medir o oxigénio (*Oxygen gas sensor XLS1047*) têm como requisito que não existam condensados na sua superfície. Assim, foi necessário adoptar um sistema de recolha de condensados na corrente de saída antes de se proceder à medição.

Uma vez conhecidos os valores das concentrações de oxigénio à saída, Figura 4.4 (a), foi possível determinar o OUR através da equação 2.2. A Figura 4.4 (b) ilustra a variação de OUR ao longo do processo de compostagem para os três reactores.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Variação ao longo do processo de: (a) Concentração oxigénio à saída do reactor; (b) OUR.

Através da análise da Figura 4.4 (b) verifica-se um aumento abrupto de OUR nos primeiros três dias de compostagem. Este comportamento traduz a elevada actividade microbiana inicialmente observada nos três reatores, a qual se traduziu também numa elevação acentuada de temperatura.

À medida que o processo decorre, a actividade microbiana vai diminuindo e observa-se uma diminuição de OUR, ou seja, das necessidades de oxigénio.

No 6º dia do processo, pelas razões já descritas, verificou-se um ligeiro aumento de OUR, para os reactores 2 e 3. Este facto resultou de que a diminuição do caudal de ar, permitiu retomar novamente a fase termofílica. Após esse aumento, observou-se novamente um decréscimo nos 14º e 11º dias de processo para os reactores 2 e 3 respectivamente, dado que a actividade microbiana decresceu.

Na fase final dos processos de compostagem os valores de OUR para os reactores 1, 2 e 3 foram respectivamente 0,07; 0,02 e 0,02 gO₂/kgVS.h. Estes valores são concordantes com os indicados por Gea *et al.* (2004), o qual refere que no 21º dias de compostagem os valores de OUR atingiram 0,11 gO₂/kgVS.h.

4.1.3. Monitorização de outros parâmetros

Durante o processo de compostagem, foram também avaliados outros parâmetros para obter uma melhor compreensão do desenvolvimento do processo, que tem uma duração temporal elevada.

Ao longo do processo verifica-se uma diminuição progressiva da massa da mistura, Figura 4.5, devido à degradação microbiana da matéria orgânica. Consequentemente ocorreu uma diminuição da altura da mistura no reactor.

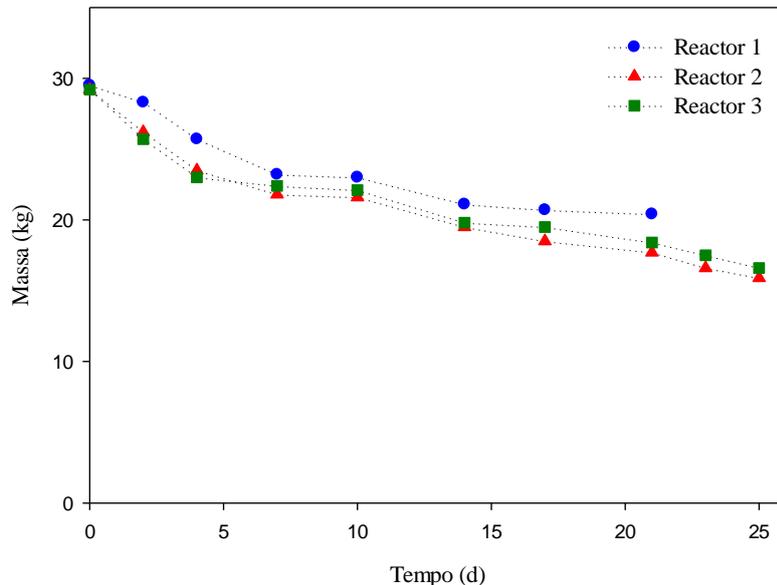


Figura 4.5 – Variação da massa da mistura ao longo do processo para os três reactores.

Inicialmente, os reactores foram preenchidos com de 29,5 kg, obtendo-se no final do processo 20,4; 15,9 e 16,6 kg para os reactores 1, 2 e 3 respectivamente. Foram

também retiradas, ao longo do processo, amostras de cerca de 500 gramas para cada reactor.

A Figura 4.6 (a) e (b) ilustra os comportamentos do *Free Air Space* – FAS e da densidade *bulk* ao longo do processo de compostagem. Em termos práticos, a porosidade do material que está a ser degradado, corresponde aos espaços interparticulares, a qual diminui ao longo do tempo. Como consequência, há um aumento da compactação do material, traduzindo-se num aumento da densidade *bulk*.

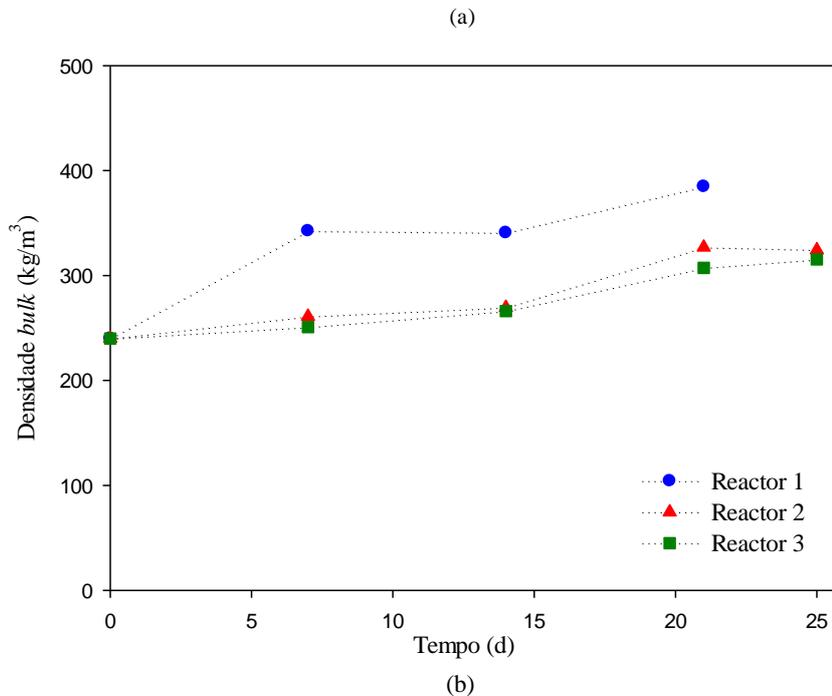
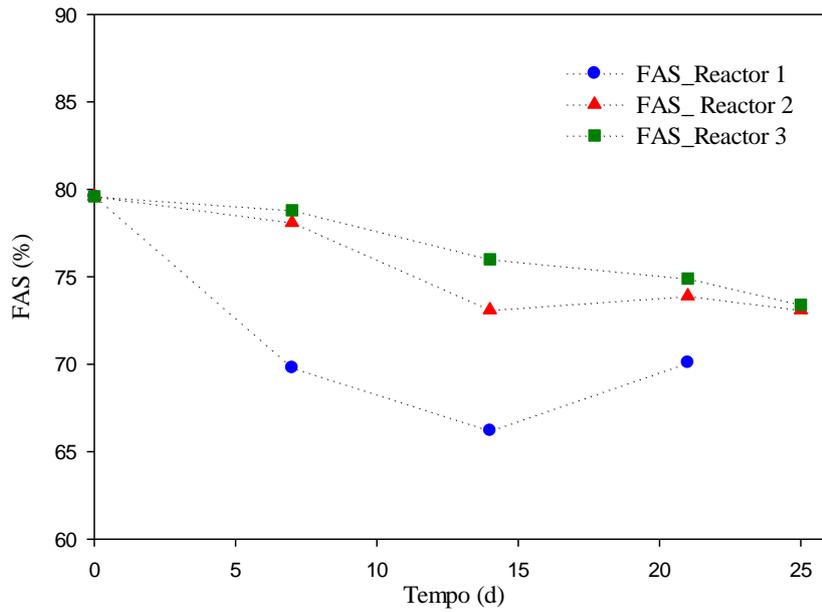


Figura 4.6 – Variação ao longo do processo de: (a) FAS; (b) densidade *bulk*.

O FAS foi calculado com base na equação (3.4) e variou entre 80 e cerca de 70 %. Na literatura são reportados valores de 41 % - 70 % (Berthe *et al.*, 2007). A densidade *bulk* variou entre 240 e 385 kg/m³, estando esta gama de acordo com os valores de literatura (182 kg/m³ – 918 kg/m³ segundo Richard *et al.* (2004)).

O teor de humidade corresponde à água livre presente na mistura e, pelas razões anteriormente referidas no capítulo 2, tem um papel fundamental para a mistura. É importante referir que o valor que normalmente é recomendado se situa entre os 40 a 60 %. No entanto, para a mistura em análise o valor de partida bem como o observado ao longo do tempo, Figura 4.7, foi sempre superior a 70 %. Este facto resulta das propriedades intrínsecas do material, designadamente da casca de batata a qual tem uma humidade de 87,9 %. Na prática este parâmetro pode variar ao longo do tempo dado que existe a possibilidade de perder água através do caudal de gás que atravessa o sistema ao longo do tempo.

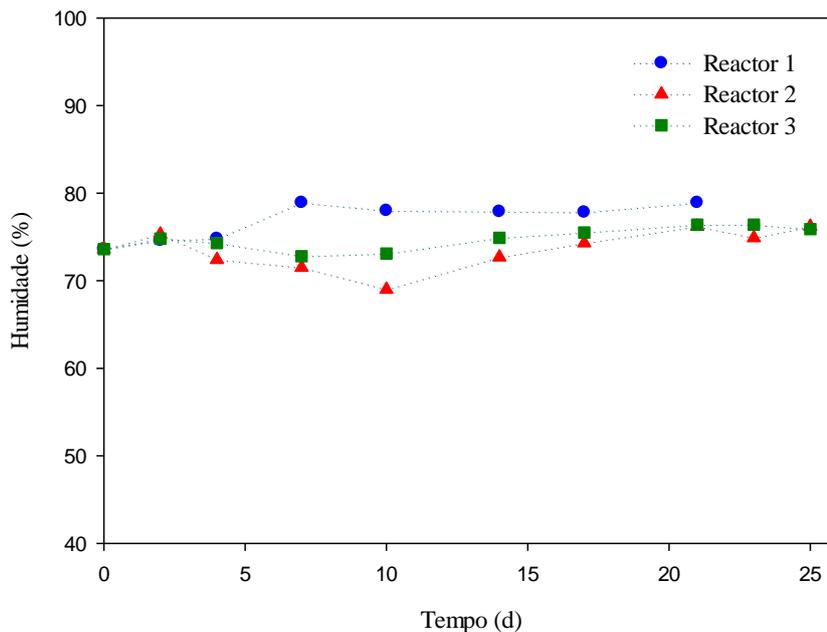


Figura 4.7 - Variação do teor de humidade ao longo do processo para os três reatores.

A Figura 4.7 mostra que o teor de humidade diminuiu para os reatores 2 e 3 até ao 6º dia de compostagem, devendo-se esta perda ao arrastamento de água pelo caudal de ar. É de referir que o ar à entrada dos reatores estava saturado em água.

Perante este cenário verifica-se que os valores de teor de humidade são superiores a 65 % (valor de referência segundo Bernal *et al.* (2009) e Trautmann e Krasny (1997)), isto leva a afirmar que a água preenche os espaços vazios dificultando a passagem de oxigénio.

A Figura 4.8 representa a evolução da matéria orgânica ao longo do tempo, e tal como é expectável, a sua quantidade diminui ao longo do tempo.

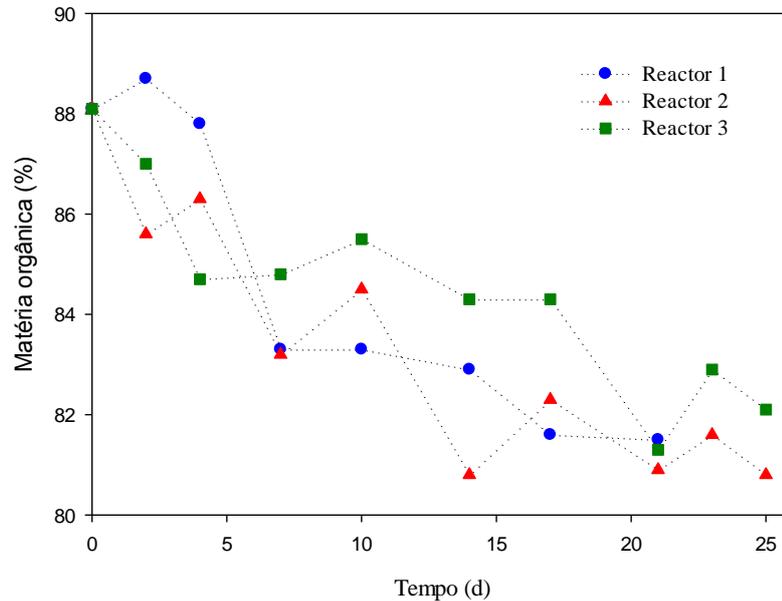


Figura 4.8 - Variação do teor de matéria orgânica ao longo do processo para os três reatores.

Esta situação deve-se ao facto de que a matéria orgânica vai sendo degradada pelos microrganismos. De facto, durante o processo há libertação de dióxido de carbono e vapor de água por respiração, devido à metabolização dos resíduos orgânicos pelos microrganismos, para a obtenção de energia, isto é, como fonte de carbono. É importante notar que nos ensaios efectuados, a percentagem de matéria orgânica inicial é muito elevada (cerca de 88 %). No final, os compostos obtidos têm também uma percentagem de matéria orgânica elevada, mas agora perto dos 80 %.

Relativamente à evolução da razão C/N, é possível verificar através da Figura 4.9 a sua evolução ao longo do processo.

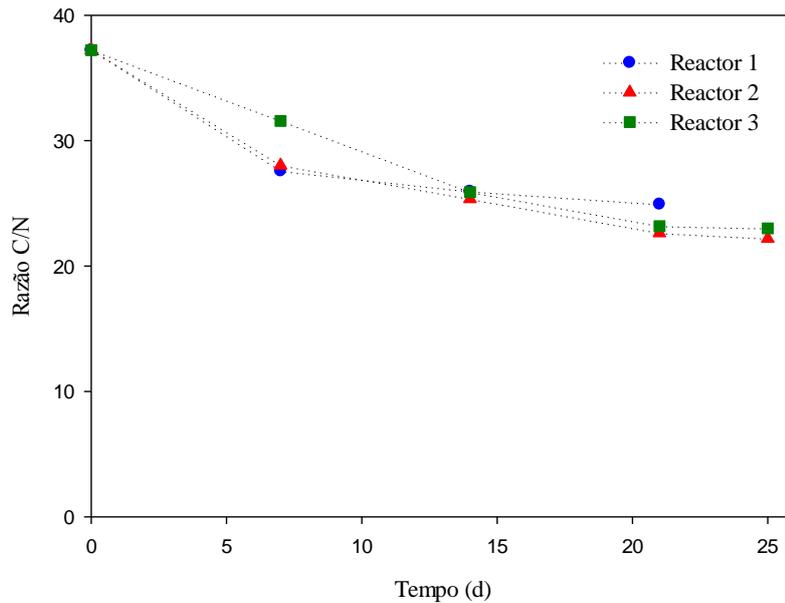


Figura 4.9 - Variação da razão C/N ao longo do processo para os três reatores.

A razão C/N na mistura inicial foi igual para os três reatores, sendo o seu valor 37,2. De acordo com a literatura, a gama óptima é 25 – 35 (Bernal *et al.*, 2009), e como tal o sistema estudado estava ligeiramente acima do valor superior da gama recomendada (Bernal *et al.*, 2009).

Uma justificação para a razão C/N apresentar um valor elevado está no tipo de materiais que foram utilizados para o processo de compostagem, como é o caso da palha de trigo. Na verdade, este material apresenta como principais constituintes a hemicelulose (39 %), celulose (29 %) e a lenhina (18,6 %) (Demirbas, 2003). Principalmente a lenhina apresenta grande resistência a ataques microbianos, tornando difícil a sua degradação por acção microbológica, (Benito *et al.*, 2009). Assim, o que vai sendo degradado mais facilmente será a casca de batata e as aparas de relva.

Ainda referente à representação da Figura 4.9, verifica-se que o parâmetro referido tende a diminuir como seria de esperar, devido ao facto de o carbono ser consumido a uma taxa superior ao azoto. No final do processo, a razão C/N atingiu cerca de 20, valor que é relativamente alto para este tipo de processos.

Em relação à evolução do pH, a Figura 4.10 mostra que inicialmente esta variável se encontrava na zona de neutralidade.

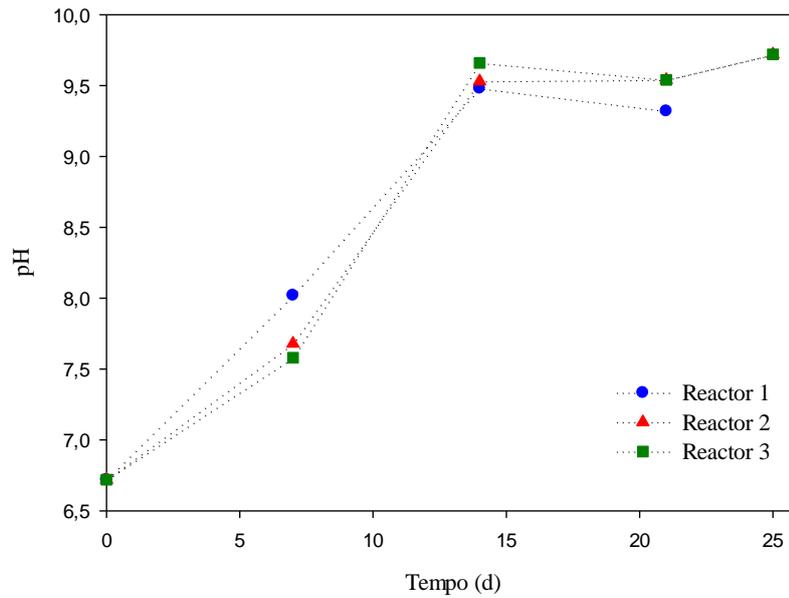


Figura 4.10 - Variação do pH ao longo do processo para os três reatores.

Ao longo da compostagem verifica-se que o valor de pH tende a aumentar, tendo se atingido valores alcalinos (superiores a 9,5), os quais resultam da degradação do azoto orgânico em azoto amoniacal.

A condutividade eléctrica está relacionada com a concentração de iões na solução, onde este parâmetro é quantificado, sendo que quanto maior o seu valor maior será a condutividade. A Figura 4.11 ilustra a evolução da condutividade eléctrica ao longo do tempo de compostagem.

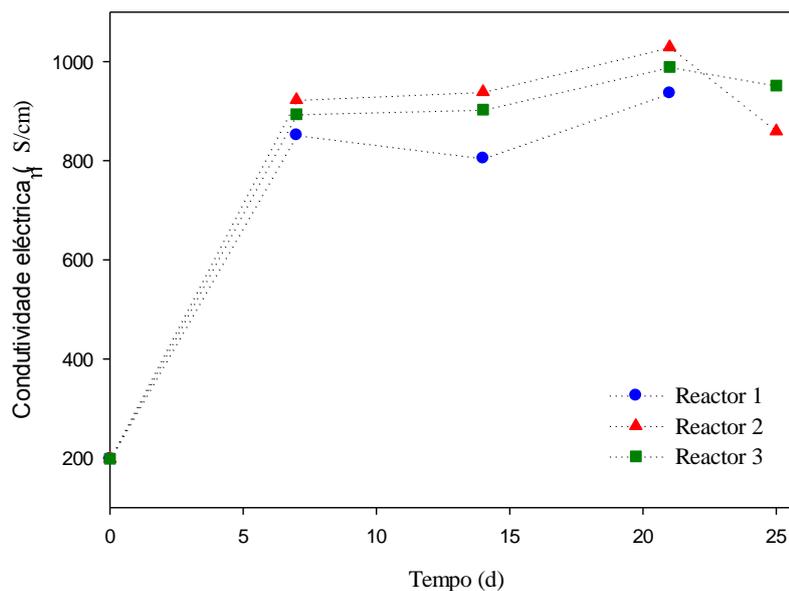


Figura 4.11 - Variação da condutividade eléctrica ao longo do processo para os três reatores.

A partir da análise da Figura 4.11 verifica-se um aumento da condutividade para todos os reactores, o que traduz um aumento da quantidade de sais solúveis na mistura. Esta evolução está em concordância com o facto de ocorrer uma diminuição do teor de matéria orgânica, mantendo-se a quantidade de sais aproximadamente constante nos reactores. No final dos processos atinge-se para os reactores 1, 2 e 3 condutividades de 936, 860 e 952 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. Pelo facto de estes valores não exceder o limite máximo de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pode concluir-se que os compostos estão em conformidade em relação a este parâmetro (Gao *et al.*, 2010).

4.2. Análise dos gradientes espaciais de temperatura

Os gradientes espaciais de temperatura foram analisados apenas no reactor 1, nos dias 4º, 7º e 8º de compostagem, uma vez que o reactor se encontrava na fase termofílica. As medições foram realizadas antes e depois de se efectuar a homogeneização da mistura, a fim de compreender melhor até que ponto esta operação iria influenciar a temperatura. A matriz espacial dos pontos de medição de temperatura encontra-se indicada na Figura 4.12.

Assim foram realizadas medições para diferentes alturas de mistura. Inicialmente, no 4º dia de compostagem realizaram-se medições a 3, 8, 13, 18, 23, 28, 33 e 38 cm de altura (distância entre o ponto de medição e a placa de distribuição de ar), nas posições radiais ilustradas na Figura 4.12 (b).

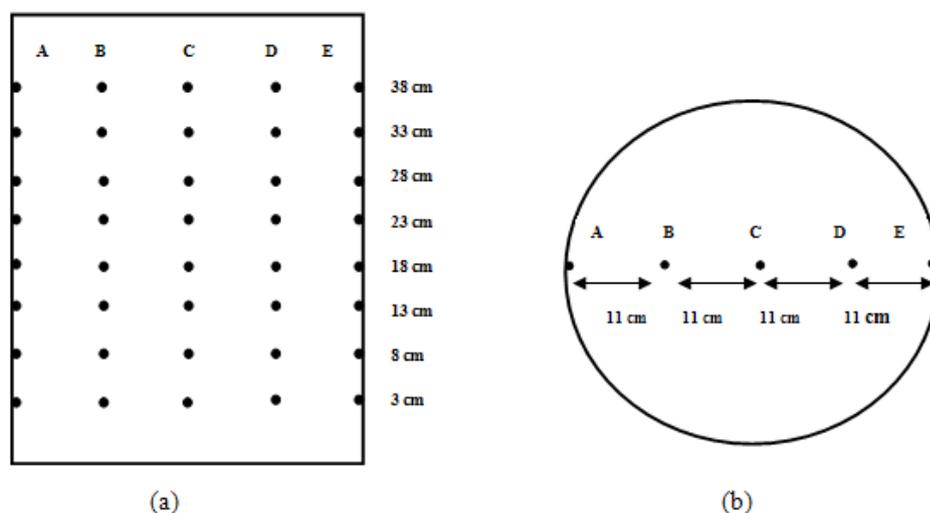


Figura 4.12 – Representação esquemática dos reactores: (a) pontos de medição de temperatura, no início do processo; (b) pontos radiais de medição.

À medida que o processo de compostagem evoluiu, a altura da mistura diminuiu e, conseqüentemente, as distâncias entre o ponto de medição e a placa distribuição de ar também diminuíram. Os resultados numéricos das medições efectuadas encontram-se no Anexo E.

Na Figura 4.13 são apresentados os perfis bidimensionais de temperatura da mistura de compostagem no reactor 1 nos dias anteriormente indicados.

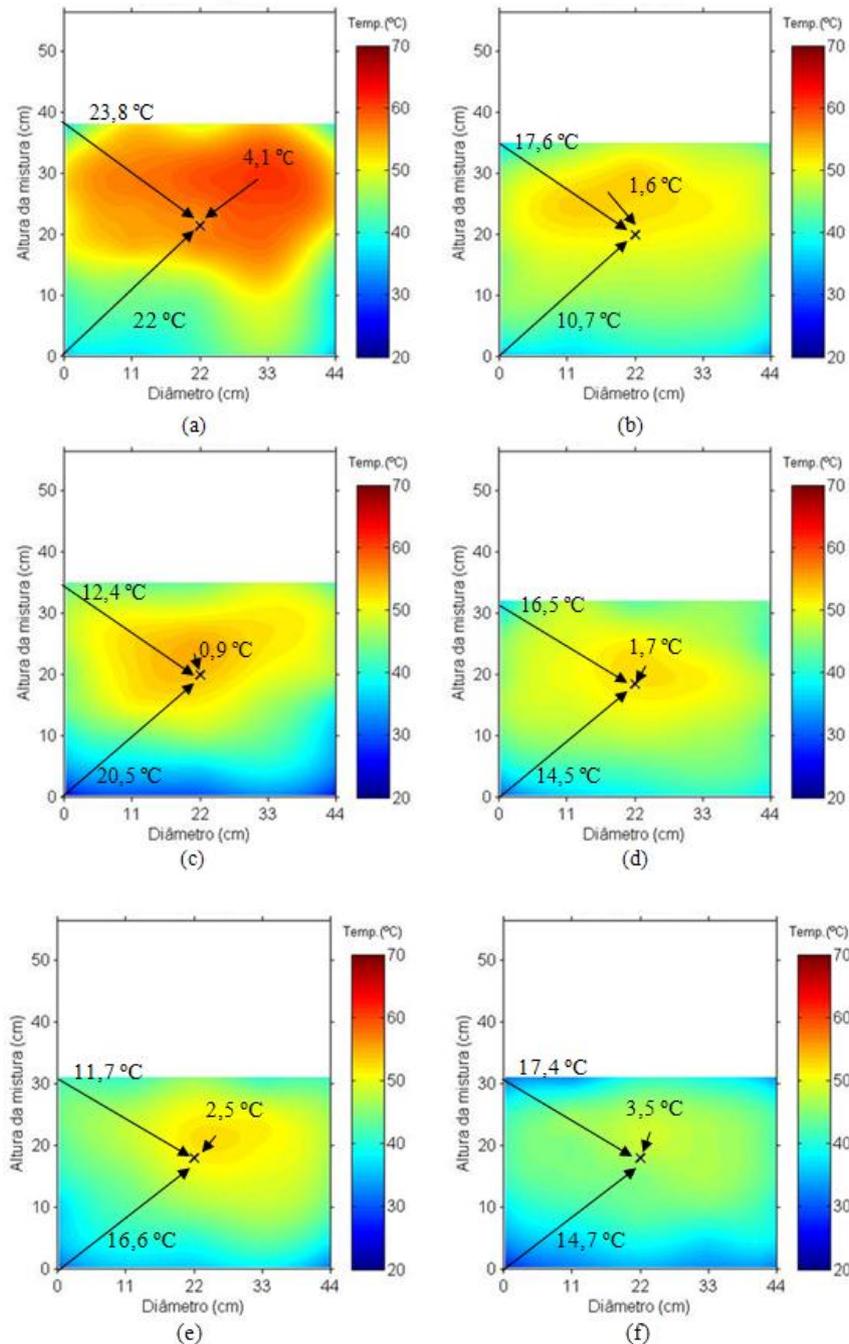


Figura 4.13 – Perfis bidimensionais de temperatura para o reactor 1: (a) 4^o dia compostagem antes homogeneização; (b) 4^o dia compostagem após homogeneização; (c) 7^o dia compostagem antes homogeneização; (d) 7^o dia compostagem após homogeneização; (e) 8^o dia compostagem antes homogeneização; (f) 8^o dia compostagem após homogeneização.

No 4º dia de compostagem é possível verificar que mesmo antes de homogeneizar a mistura, o reactor apresenta uma actividade microbiana significativa, uma vez que grande parte da mistura se encontra a uma mesma temperatura elevada. As zonas mais frias são as que se situam junto à placa de distribuição de ar que se encontrava na base do reactor. Esta diferença de distribuição de temperaturas deve-se ao facto de o caudal de ar entrar a uma temperatura de cerca de 17 °C, o que vai perturbar a actividade microbiana arrefecendo a mistura. Após a homogeneização, verifica-se que existe uma distribuição mais uniforme da temperatura, apesar de ter valores mais baixos.

Os gradientes de temperatura indicados na Figura 4.13 foram determinados, tendo como referência a temperatura máxima que a mistura apresentava. Assim, no 4º dia de compostagem, antes de homogeneizar a mistura, Figura 4.13 (a), a temperatura máxima obtida foi de 60,8 °C. Para a mesma Figura, verificou-se que no centro da mistura, havia um gradiente de cerca de 4,1 °C, enquanto a base e o topo registavam respectivamente 22 e 23,8 °C (valores de temperatura relativos ao centro do reactor junto à parede, para uma distância de $x = 3$ cm, onde x é a distância entre o ponto de medição e a placa de distribuição de ar). Depois da homogeneização, verifica-se a diminuição da altura da mistura, uma vez que se retirou a quantidade de amostra. Assim, a temperatura máxima obtida foi de 53,1 °C e verificou-se que no centro da mistura, havia um gradiente de cerca de 1,6 °C, enquanto a base e o topo registaram respectivamente 10,7 e 17,6 °C, para $x = 5$ cm e $x = 35$ cm respectivamente (Figura 4.13 (b)).

No que respeita ao 7º dia de compostagem, verificou-se uma diminuição da temperatura máxima do sistema, bem como nos respectivos gradientes. Assim, antes de se homogeneizar observou-se uma temperatura máxima de 54,7 °C e verificou-se que no centro da mistura, havia um gradiente de cerca de 0,9 °C. Junto à parede, a mistura apresentava-se mais fria, Figura 4.13 (c), sendo que, para $x = 5$ cm no centro do reactor, apresentava um gradiente de 20,5 °C e no topo, $x = 35$ cm, um gradiente de temperatura de 12,4 °C. Após a homogeneização da mistura, através da Figura 4.13 (d), observa-se uma melhor distribuição das temperaturas. A temperatura máxima foi de 52,5 °C e os gradientes de temperatura no centro da mistura foi de 1,7 °C e para as referidas posições ($x = 5$ cm e $x = 35$ cm) foi de 14,5 e 16,5 °C respectivamente.

No 8º dia de compostagem, antes e depois de homogeneizar a mistura, Figuras 4.14 (e) e (f) respectivamente, observa-se que esta apresenta valores de temperatura mais quentes no centro do reactor e mais frias junto à parede do mesmo, sendo que o

escoamento preferencial pode estar na origem destes resultados. As temperaturas máximas observadas na mistura antes e depois da homogeneização são respectivamente 52,1 e 48,2 °C. Quanto aos valores de gradientes, antes de se homogeneizar observou-se que no centro da mistura, o gradiente era de 2,5 °C, junto à parede para $x = 5$ cm, apresentava-se um gradiente de 16,6 °C e, no topo para $x = 31$ cm, um gradiente de temperatura de 11,7 °C. Após a homogeneização, no centro da mistura verificou-se um gradiente de 3,5 °C e para $x = 5$ cm e $x = 35$ cm, os gradientes foram respectivamente 14,7 e 17,4 °C.

Após esta análise conclui-se que a homogeneização influencia de certa forma as temperaturas, uma vez que nos casos apresentados verifica-se, após o revolvimento, uma distribuição mais homogénea da temperatura.

A variação que se observa afecta a cinética do processo de compostagem. A existência de gradientes de temperatura pode estar na origem de alguns factores, nomeadamente o isolamento do reactor, que pode ter sido inadequado para o efeito e consequentemente originar perdas de calor, e também o escoamento preferencial do arejamento, que pode levar a zonas propícias à actividade biológica, ou pelo contrário provoca dissipação de calor.

4.3. Análise da estabilidade do composto

A estabilidade do composto foi avaliada através de respirometria, realizada num extracto obtido de acordo com a metodologia indicada no capítulo 3. Este ensaio permitiu determinar o *Specific Oxygen Uptake Rate* – SOUR. A monitorização do SOUR foi realizada apenas ao reactor 2, devido a limitações logísticas, uma vez que correspondia ao reactor com caudal intermédio de ar (6,62 L/min).

Esta determinação foi realizada em amostras recolhidas no 1º, 3º, 8º, 9º, 11º, 15º, 22º e 24º dias de compostagem.

A Figura 4.14 apresenta os resultados obtidos na medição do oxigénio dissolvido, das referidas amostras recolhidas, ao longo do tempo.

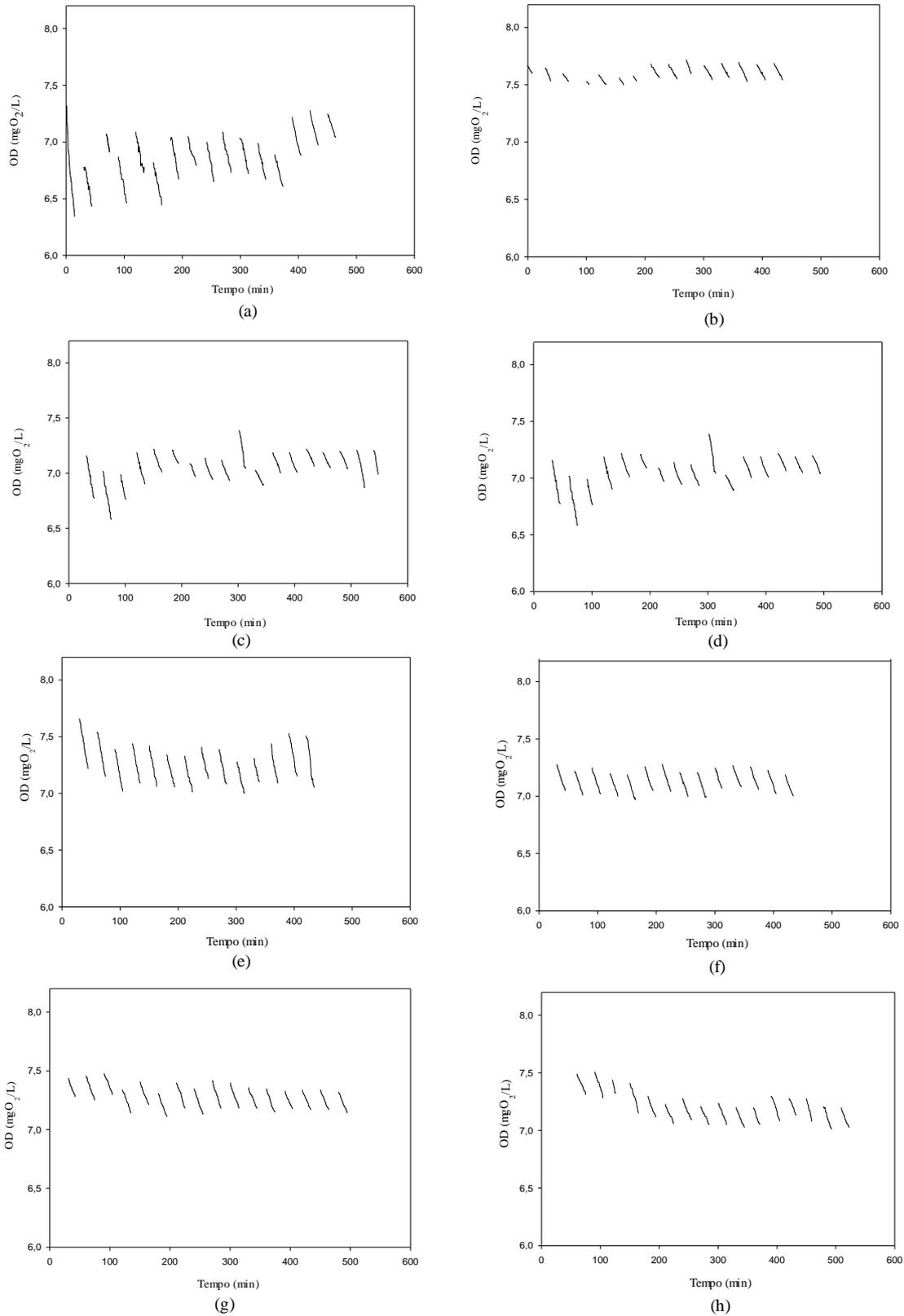


Figura 4.14 – Oxigênio dissolvido ao longo do tempo, nos testes do SOUR: (a) 1º dia; (b) 3º dia; (c) 8º dia; (d) 9º dia; (e) 11º dia; (f) 15º dia; (g) 22º dia; (h) 24º dia.

A Figura 4.15 mostra a evolução do SOUR para os diversos dias de compostagem.

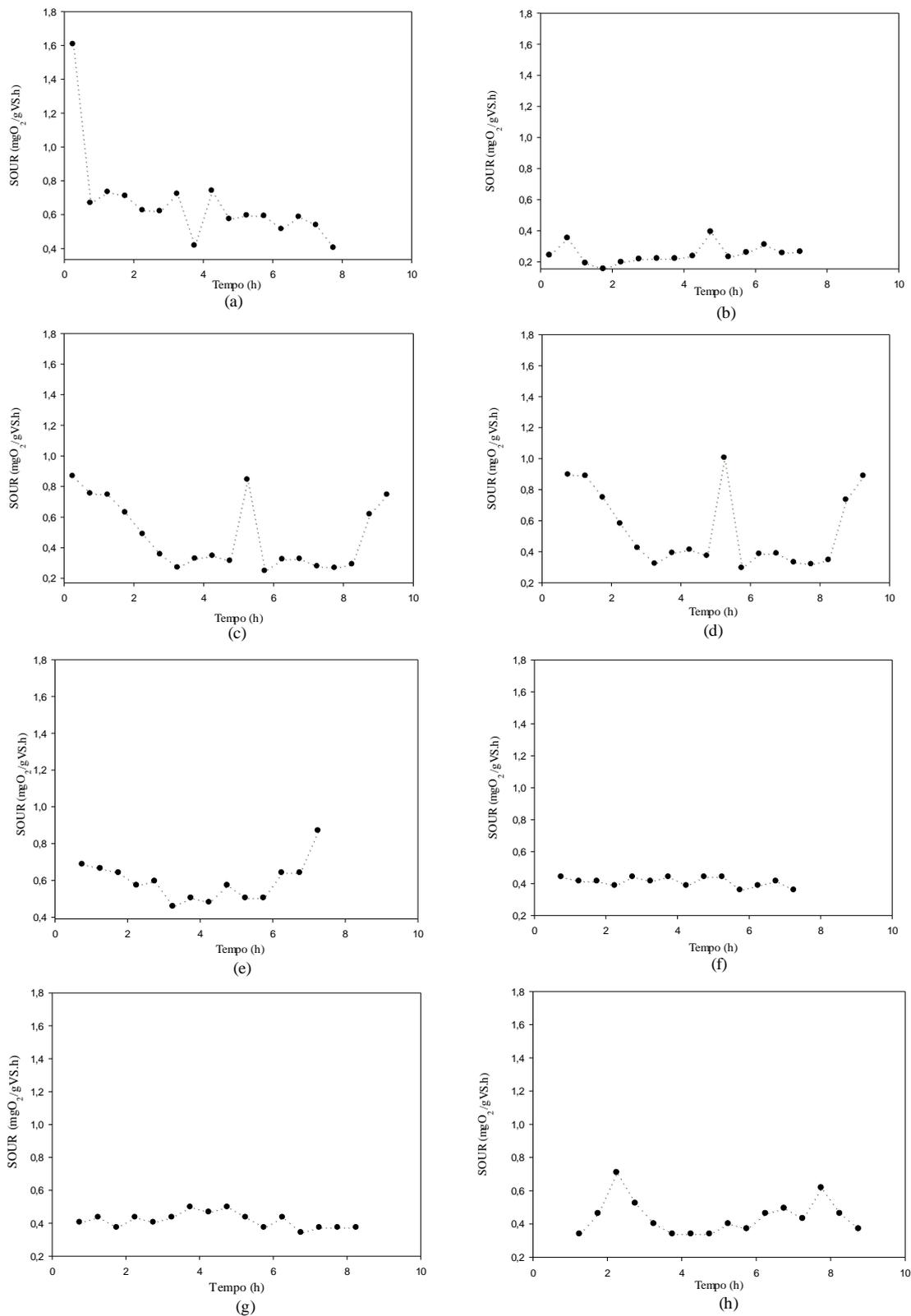


Figura 4.15 – Variação do SOUR: (a) 1º dia; (b) 3º dia; (c) 8º dia; (d) 9º dia; (e) 11º dia; (f) 15º dia; (g) 22º dia; (h) 24º dia.

Com base nos resultados da Figura 4.15, foram obtidos os resultados do SOUR indicados na Figura 4.16 ao longo do processo de compostagem, que correspondem aos valores médios indicados em cada uma das Figuras 4.15 (a) – (h).

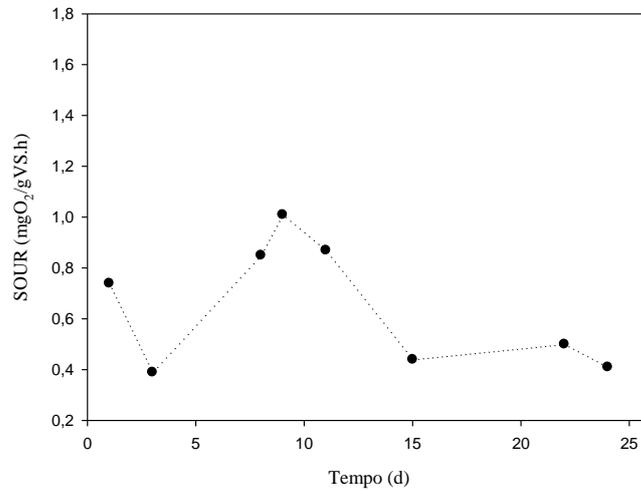


Figura 4.16 – Variação do SOUR ao longo do processo de compostagem, referente ao reactor 2.

Para os primeiros dias de compostagem era esperado que o SOUR apresentasse um valor significativamente mais elevado do que o que se obteve. De acordo com Gao *et al.* (2010) o valor máximo de SOUR obtido para o sistema em análise atingiu valores na gama de 21,2 e 39,2 mgO₂/gVS.h em 9 a 12 dias de compostagem. Também Pullicino *et al.* (2007) obteve como valor máximo de SOUR 17,5 mgO₂/gVS.h em cerca de 5 dias de compostagem.

Uma vez que os valores experimentais obtidos neste estudo não vão além de 1 mgO₂/gVS.h, isso significa que este índice respirométrico não terá sido avaliado da melhor forma. De facto, após realizar o extracto, os microrganismos podem necessitar de uma fase de adaptação mais ou menos longa às condições experimentais do teste. Um outro factor que poderá ter contribuído para estes resultados não conclusivos, poderá estar relacionado com o facto de o teste ter sido realizado no dia seguinte à colheita da amostra, devido a limitações no funcionamento do equipamento de medição, o qual não permite fazer registos para além das 12 horas.

Apesar de se referir na literatura que o composto se apresenta estável para valores inferiores a 1 mgO₂/gVS.h (Lasaridi e Stentiford, 1998), não podemos tirar conclusões acerca do grau da estabilidade do composto, pois se adoptássemos o critério de estabilidade referido, o composto estaria estável desde o primeiro dia de compostagem, o que não é credível.

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO

O principal objectivo deste trabalho foi a monitorização de um processo de compostagem à escala laboratorial. Em particular, foi avaliada a influência da taxa de arejamento na actividade microbiana ao longo do processo, bem como a sua influência ao nível do perfil temporal de temperatura.

Os materiais testados nos três reactores laboratoriais foram a casca de batata, aparas de relva e palha de trigo, nas proporções de 52, 30 e 18 % respectivamente. Esta mistura conduziu a uma razão C/N inicial relativamente elevada (cerca de 37,2).

No que diz respeito ao comportamento térmico, verificou-se que os três reactores rapidamente atingiram temperaturas na gama termofílica, as quais se mantiveram durante algum tempo.

Ao nível do caudal de arejamento, inicialmente tinha-se estabelecido operar com 2,09; 6,62 e 10,80 L/min. No entanto, nos casos dos dois caudais mais elevados foi necessário intervir dado que a fase termofílica tinha tido uma duração muito reduzida. Na prática, verificou-se que ao diminuir o caudal, foi rapidamente possível registar um novo aumento de temperatura. Assim, pode concluir-se que a taxa de arejamento tem uma influência crucial na actividade microbiana, e será a melhor variável de controlo para este processo. Esta influência foi quantificada através do *Oxygen Uptake Rate* - OUR, tendo-se verificado que este parâmetro pode atingir valores máximos de 3,20; 3,93 e 3,91 gO₂/kgVS.h, mas que regista uma diminuição à medida que a actividade microbiana diminui.

Relativamente à monitorização dos outros parâmetros, verificou-se que de um modo geral, os resultados tinham uma evolução dentro dos padrões esperados. Em relação à razão C/N, o valor final obtido era relativamente elevado. Este facto resultou do tipo de materiais usados e em particular da palha de trigo, em que a lenhina é um dos constituintes que resiste significativamente aos ataques microbianos.

Os gradientes espaciais de temperatura no interior dos reactores podem ser bastante elevados, tendo-se registado valores de 23,8 °C. Este facto mostra que as perdas de calor são ainda relativamente elevadas e que o escoamento preferencial pode dar origem tanto a zonas de baixa como de elevada actividade microbiana.

Os testes de respirometria realizados em extractos aquosos não foram conclusivos quanto ao grau de estabilidade atingida pelo composto.

Trabalho Futuro

Tal como habitual em trabalhos desta natureza, no futuro devem ser explorados diversos aspectos. Nomeadamente, o aspecto mais importante a ser reequacionando é o método para avaliar a estabilidade do composto. Neste caso, devem ser questionadas principalmente a duração para a obtenção do extracto, e o tempo de determinação do SOUR.

Um aspecto importante a estudar é a influência da existência de gradientes de concentração de oxigénio na mistura, permitindo assim uma melhor identificação de zonas com maior oxigenação através da representação de perfis bidimensionais. Também a análise dos gradientes de temperatura deve merecer uma análise mais detalhada, a fim de determinar a sua influência nas constantes cinéticas de degradação da matéria orgânica.

A nível de questões logísticas, será importante melhorar o isolamento dos reactores, uma vez que se observaram gradientes de temperatura elevados. Neste âmbito seria interessante avaliar a influência que teria o aquecimento do ar à entrada dos reactores.

Bibliografia

Adani, F., Gigliotti, G., Valentini, F., e Loraia, R. (2003). *Respiration Index Determination: A Comparative Study of Different Methods*. *Compost Science & Utilization* 11,144-151.

Agência Portuguesa do Ambiente. (s.d.). Obtido em 5 de Janeiro de 2011, de http://www.apambiente.pt/Destaques/Documents/Res%C3%ADduos%20em%20Portugal/Relat%C3%B3rio_%20RU_2009.pdf

Ahn, H., Richard, T., e Choi, H. (2007). Mass and thermal balance during composting of a poultry manure - Wood shavings mixture at different aeration rates. *Process Biochemistry* 42, 215-223.

Andrade, S. (2010). Estudo Laboratorial da Conversão de Matéria Orgânica em Biofertilizantes. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Química, Coimbra.

Avnimelech, Y., e Chen, Y. (1986). *The role of organic matter in modern agriculture*. Martinus Nijhoff Publishers, Bratislava.

Bari, Q. H., e Koenig, A. (2001). Effect of air recirculation and reuse on composting of organic solid waste. *Resources, Conservation and Recycling* 33, 93-111.

Barrena, R., Artola, A., Vázquez, e Sánchez, A. (2009). The use of composting for the treatment of animal by-products: Experiments at lab scale. *Journal of Hazardous Materials* 161, 380-386.

Barrena, R., Turet, J., Busquets, A., Farrés, M., Font, X., e Sánchez, A. (2010). Respirometric screening of several types of manure and mixtures intended for composting. *Bioresource Technology*, 1-11.

Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., Hontoria, C., e Almorox, J. (2009). Dynamics of pruning waste and spent horse litter co-composting as determined by chemical parameters. *Bioresource Technology* 100, 497-500.

Bernal, M., Albuquerque, J., e Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* 100, 5444-5453.

Compostagem doméstica. (s.d.). Obtido em 16 de Outubro de 2010, de <http://www.amism.pt/Portals/1/pdf/Guia%20Compostagem.pdf>

Cornell Waste Management Institute. (s.d.). Obtido em 16 de Outubro de 2010, de <http://cwmi.css.cornell.edu/composting.htm#sciencemanagement>

Decreto-Lei nº. 178/2006 de 5 Setembro. Diário da República nº171/2006 - 1ª. Série. Ministério do Ambiente. Lisboa.

Demirbas, A. (2003). Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. *Energy Conversion Management* 44, 1481-1486.

EN13037:1999. Soil improvers and growing media-Determination of pH.

EN13038:1999. Soil improvers and growing media-Determination of electrical conductivity.

EN13654-1:2001. Soil improvers and growing media-Determination of nitrogen - Part 1: Modified Kjeldahl method.

Gao, M., Liang, F., Yu, A., Li, B., e Yang, L. (2010). Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios. *Chemosphere* 78, 614-619.

Gea, T., Barrena, R., Artola, A., e Sánchez, A. (2004). Monitoring the Biological Activity of the Composting Process: Oxygen Uptake Rate (OUR), Respirometric Index (RI) and Respiratory Quotient (RQ). *Wiley Periodicals, Inc* 88, 520-527.

Gómez, R. B., Lima, F. V., Bolasell, M. A., Gea, T., e Ferrer, A. S. (2005). Respirometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process. *Bioresource Technology* 96, 1153-1159.

Gómez, T. B., Lima, F. V., e Ferrer, A. S. (2006). The use of respiration indices in the composting process: a review. *Water Management Research* 24, 37-47.

- Guardia, A., Petiot, C., e Rogeau, D. (2008). Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics. *Waste Management* 28, 73-84.
- Hoyos, S., Juárez, J., Ramonet, C., López, J., Rios, A., e Uribe, E. (2000). Aerobic Thermophilic Composting of Waste Sludge from Gelatine - Grenetine Industry. vol.34, 161-173.
- Komilis, D. P., e Tziouvaras, I. S. (2009). A statistical analysis to assess the maturity and stability of six compost. *Waste Management* 29, 1504-1513.
- Kulcu, R., e Yaldiz, O. (2004). Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes. *Bioresource Technology* 93, 49-57.
- Lasaridi, K. K., e Stentiford, E. I. (1998). A simple respirometric technique for assessing compost stability. *Water Resource* 32, 3717-3723.
- Li, X., Zhang, R., & Pang, Y. (2008). Characteristics of dairy manure composting with rice straw. *Bioresource Technology* 99, 359-367.
- Martins, A. L. (2007). Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudos Laboratoriais. Seminário, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Química, Coimbra.
- Moura, A. I. (2007). Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos: Processos Industriais. Seminário, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Química, Coimbra.
- Portaria nº. 187/2007 de 12 Fevereiro. Diário da República nº. 30/2007 - 1ª Série. Ministério do Ambiente, Lisboa.
- Pullicino, D. S., e Gigliotti, G. (2007). Oxidative biodegradation of dissolved organic matter during composting. *Chemosphere* 68, 1030-1040.
- Pullicino, D. S., Erriquens, F. G., e Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology* 98, 1822-1831.
- Puyuelo, B., Gea, T., e Sánchez, A. (2010). A new control strategy for the composting process based on the oxygen uptake rate. *Chemical Engineering Journal* 1-9.

Ribeiro, A. (2008). Valorização de Resíduos para Produção de Biofertilizantes por Compostagem. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Química, Coimbra.

Richard, T. L., Veeken, A. H., Wilde, V., e Hamelers, H. (2004). Air-Filled Porosity and Permeability Relationships during Solid-State Fermentation. *Biotechnol. Prog* 20, 1372-1381.

Ruggieri, L., Gea, T., Artola, A., e Sánchez, A. (2009). Air filled porosity measurements by air pycnometry in the composting process: A review and correlation analysis. *Bioresource Technology* 100, 2655-2666.

Russo, M. A. (2003). Tratamento de Resíduos Sólidos. Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra.

Santos, L. M. (2001). Resíduos com Interesse Agrícola: Evolução de Parâmetros da sua Compostagem. Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança.

Trautmann, N. M., & Krasny, M. E. (2000). *Composting in the Classroom: Scientific Inquiry for High School Students*. Kendall/Hunt Publishing Company: Iowa.

Anexos

ANEXO A – Características dos equipamentos utilizados

Características do isolamento utilizado nos reactores:

- Marca do Produto: Manta Aeroflex MSR;
- Tipo de material: Espuma de borracha;
- Espessura: 19 mm;
- Número de camadas a aplicar em cada reactor: duas camadas, num total de 38mm de espessura;
- Condutividade eléctrica: 0,035W/m.K.

Características do conjunto equipamento sondas de temperatura e aquisição de dados:

- Sondas de temperatura:
 - Referência do produto: Bresimar.T.K.1.8.500.S5
 - Termopar, Tipo: K;
 - Combinação de condutores: Níquel-Crómio-Níquel;
 - Diâmetro da bainha: 8 mm;
 - Comprimento da bainha: 500 mm;
 - Revestimento da bainha: Aço Inox AISI316;
 - Comprimento cabo termopar: 5 m;
 - Gama de temperatura do termopar: 0 – 1100°C;
 - Revestimento cabo de ligação: Silicone (suporta até 200°C)

- Aparelho de aquisição de dados:
 - DATALOGGER/VIRTUAL HMI CSMSTRSX;
 - Mod. Entradas 16bit 8AI Termopares CSTSC8000;
 - COMPACT FLASH CARD 64mb G3CF064M.

Características do conjunto equipamento sondas de oxigênio:

- Referência do produto: *Oxygen gás sensor XLS1047*;
- Gama de concentrações percentuais: 0 – 100% Oxigênio;
- Resolução: 0,03% (12bit);
- Tempo de resposta: 90% - 30 segundos;
- Humidade relativa: 0 – 95%;
- Gama de temperatura: 0 – 50°C.

ANEXO B – Calibração dos rotâmetros

Para cada reactor foram determinadas as respectivas curvas de calibração dos rotâmetros para determinar a respectiva posição referente ao valor caudal de ar.

A elaboração das curvas de calibração para determinar o caudal de ar para os respectivos reactores seguiu-se o seguinte experimento:

1. Para cada posição do rotâmetro fez-se passar uma corrente de ar através de um dispositivo constituído por uma bureta contendo detergente;
2. Registou-se o tempo que a bolha de sabão demora a percorrer um determinado volume no dispositivo adoptado;
3. Determinou-se o caudal de ar, Q_v , através da razão entre o volume que a bolha de sabão percorre no dispositivo e o tempo que demora a percorrer esse mesmo volume.

A Tabela B.1 apresenta os valores obtidos de caudal de ar para as diversas posições no rotâmetro, para os reactores 1, 2 e 3.

Tabela B.1 - Valores dos caudais volumétricos para cada posição rotâmetro nos reactores.

Posição Rotâmetro	Q_v R1 (l/min)	Q_v R2 (l/min)	Q_v R3 (l/min)
2	2,21	1,69	1,95
4	3,99	3,02	4,18
6	5,93	4,35	6,30
8	8,11	6,09	8,46
10	9,19	7,42	10,87
12	10,94	8,56	12,02
14	12,11	9,54	14,05

A Figura B.1 apresenta as representações gráficas das curvas de calibração para os três reactores.

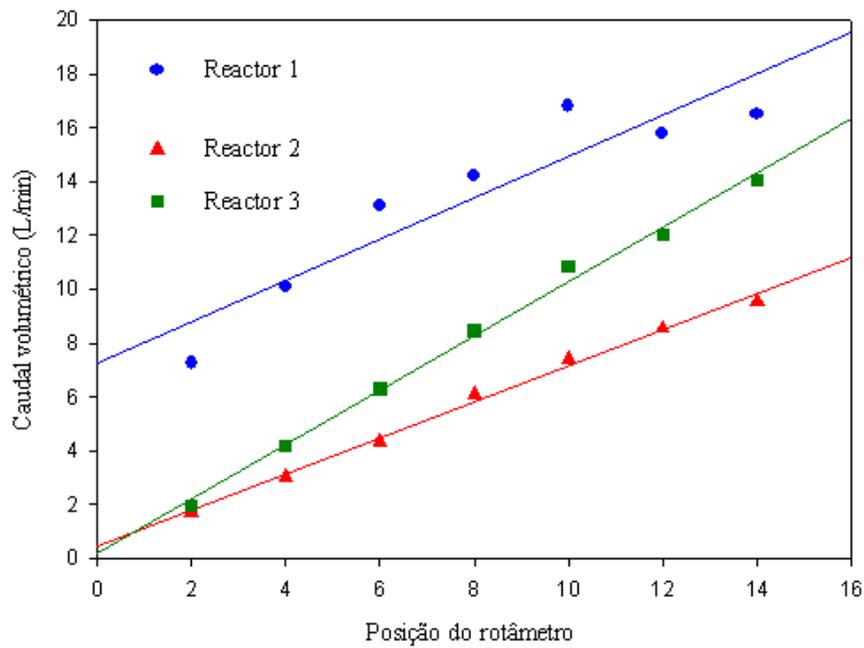


Figura B.1 – Representação gráfica das curvas de calibração para os respectivos reatores.

Através da Figura B.1 obteve-se as regressões lineares para os respectivos reatores.

- Reactor 1:

$$Qv_1 = 0,8366 \text{ Posição_rot1} + 0,8035$$

- Reactor 2:

$$Qv_2 = 1,3456 \text{ Posição_rot2} + 0,4312$$

- Reactor 3:

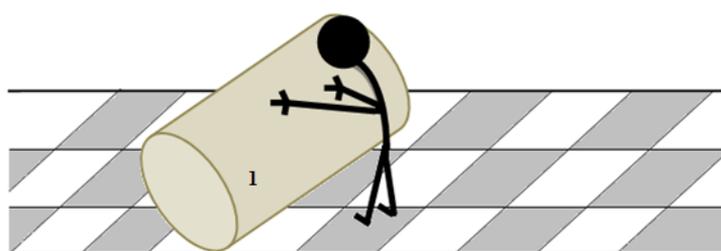
$$Qv_3 = 1,0095 \text{ Posição_rot3} + 0,1835$$

ANEXO C – Procedimento do revolvimento e pesagem dos reactores

Revolvimento dos reactores

Para realizar o revolvimento dos reactores, levou-se o reactor para uma zona de espaço livre, para que fosse possível rolá-lo no chão através de uma distância não contabilizada.

Este procedimento foi realizado individualmente para cada reactor, isto é, um de cada vez. A Figura C.1 apresenta esquematicamente o procedimento.

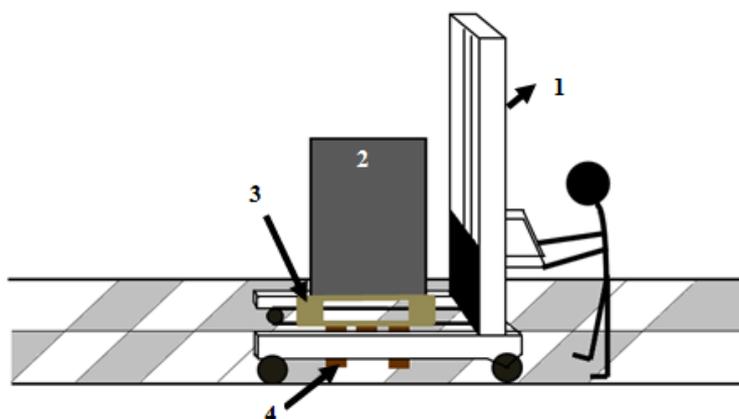


Legenda:
1 – Reactor

Figura C.1 – Representação esquemática do revolvimento do reactor.

Pesagem dos reactores

Para realizar a pesagem dos reactores, utilizou-se um porta-paletes para elevar a paleta juntamente com o reactor. Assim que este conjunto se elevou, colocou-se uma balança doméstica por debaixo do mesmo conjunto deixou-se cair e registou-se o seu valor. A Figura C.2 apresenta esquematicamente o procedimento.



Legenda:
1 – Porta-paletes;
2 – Reactor;
3 – Paleta;
4 – Balança.

Figura C.2 - Representação esquemática da pesagem do reactor.

ANEXO D – Preparação das soluções para o teste de Respirometria

Para realizar o teste de respirometria foi necessário preparar uma solução tampão fosfatos e três soluções de nutrientes, o cloreto de cálcio, o cloreto de ferro e o sulfato de magnésio.

As soluções foram preparadas de acordo com o seguinte procedimento:

Solução tampão de fosfatos:

Dissolver em 500 ml de água destilada:

- 8,5 g de dihidrogenofosfato de potássio (KH_2PO_4)
- 21,75 g de (K_2HPO_4)
- 33,4 g de hidrogenofosfato de dipotássio ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 1,7 g de cloreto de amónia (NH_4Cl)

Diluir a 1000 ml e homogeneizar.

O pH desta solução deve ser de 7,2 sem necessitar ajuste.

Solução de sulfato de magnésio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$):

Dissolver 22,5 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ em água destilada.

Diluir a 1000 ml e homogeneizar.

Solução de cloreto de cálcio (CaCl_2):

Dissolver 27,5 g de CaCl_2 em água destilada

Diluir a 1000 ml e homogeneizar.

Solução de cloreto de ferro (III) hexahidratado ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$):

Dissolver 0,25 g de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em água destilada.

Diluir a 1000 ml e homogeneizar.

ANEXO E – Resultados numéricos dos perfis de temperatura

Os perfis bidimensionais de temperatura foram obtidos realizando medições de temperatura em diferentes pontos da mistura. A disposição das sondas e os pontos onde foram realizadas as leituras de temperatura encontram-se na Figura 4.12.

Tabela E.1 - Temperaturas registadas no 4º dia de compostagem antes do revolvimento.

Localização das sondas (cm)		Distância entre o ponto de medição e a placa (cm)							
		3	8	13	18	23	28	33	38
A	-22	38,8	40,4	44	50,1	50,2	52,4	48,9	37
B	-11	39,3	43,7	46,5	54,5	55,3	57,4	56,1	52,4
C	0	42,4	44	48,6	56,5	56,7	59,5	57,4	49,1
D	11	47,7	49,4	54	57,7	59,1	60,8	59,9	53,6
E	22	36,9	37,4	39,7	45,2	52,6	53,8	50	39,2

Tabela E.2 - Temperaturas registadas no 4º dia de compostagem após revolvimento.

Localização das sondas (cm)		Distância entre o ponto de medição e a placa (cm)						
		5	10	15	20	25	30	35
A	-22	42,4	45,3	44,7	47,5	47,6	45,1	35,5
B	-11	41,1	46,8	48,8	51,4	53,1	50,4	43,8
C	0	43,2	46,4	48,3	51,5	52,6	53,1	48,1
D	11	43,2	46,3	48,1	50,4	51,5	49,9	46,7
E	22	39,1	41,5	42,7	47,5	46,8	47,1	41,9

Tabela E.3 - Temperaturas registadas no 7º dia de compostagem antes de revolvimento.

Localização das sondas (cm)		Distância entre o ponto de medição e a placa (cm)						
		5	10	15	20	25	30	35
A	-22	34,2	38,7	44,1	44,5	47	46,9	42,3
B	-11	36,8	43,7	51,1	52,3	52,7	50,4	42,7
C	0	37,2	46,9	51,2	53,8	54,7	50,6	43,8
D	11	39,5	43,8	46,6	50,3	52	51,6	48,6
E	22	33	35	38,7	46,8	46,7	48	41,5

Tabela E.4 - Temperaturas registadas no 7º dia de compostagem após revolvimento.

Localização das sondas (cm)		Distância entre o ponto de medição e a placa (cm)					
		5	10	15	20	25	32
A	-22	38	43,3	46,3	44,8	44,6	36
B	-11	41,7	46,8	49	50,3	49,5	47,8
C	0	43	48,1	50,8	52,5	51,6	42,7
D	11	44,4	46,8	49,8	51,5	48,1	45,5
E	22	41,4	41,9	45,6	46	41,3	42,4

Tabela E.5 - Temperaturas registadas no 8º dia de compostagem antes de revolvimento.

Localização das sondas (cm)		Distância entre o ponto de medição e a placa (cm)					
		5	10	15	20	25	31
A	-22	35,5	36	40,2	42,2	43,8	40,4
B	-11	40	42,8	44,9	47,4	47,3	40,7
C	0	40,3	46,2	49,6	52,1	51	45,5
D	11	43,8	47,8	49,7	51,2	50,6	40,5
E	22	38,4	43,4	45,5	46,6	46	40,4

Tabela E.6 - Temperaturas registadas no 8º dia de compostagem após revolvimento.

Localização das sondas (cm)		Distância entre o ponto de medição e a placa (cm)					
		5	10	15	20	25	31
A	-22	33,5	37,4	41,3	41,8	40,4	30,8
B	-11	36,8	41,5	44,3	44,3	45,9	32,7
C	0	39,8	43,8	44,7	48,2	47,5	40
D	11	37,5	44	46,7	46,7	46,2	38,7
E	22	37,9	39,5	42,1	41,7	41,6	32,8