

**MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2013/2014**

## **ESTUDO DE PROCESSOS DE COMPOSTAGEM CENTRALIZADA E DOMÉSTICA APLICÁVEIS À EMPRESA AMBISOUSA**

**Mariana Luzia Silva Costa**

Dissertação submetida para obtenção do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE**

**Presidente do Júri:** Cidália Maria de Sousa Botelho

(Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto)

---

**Orientador académico:** Joana Maia Moreira Dias

(Professora Auxiliar Convidada do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

**Coorientador académico:** Mário Manuel de Miranda Furtado Campos Cunha

(Professor Auxiliar do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território  
da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto)

**Orientador na empresa:** Rui Pedro Pires

(Responsável pelo Departamento de Exploração e Valorização da Ambisousa – Empresa  
Intermunicipal de Tratamento e Gestão de Resíduos Sólidos, EIM)

*Julho de 2014*



*Editado por*

*FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO*

*Rua Dr. Roberto Frias*

*4200-465 PORTO*

*Portugal*

*Tel.: +351-22-508 1400*

*Fax: +351-22-5081440*

*Correio eletrónico: [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)*

*Endereço eletrónico: <http://www.fe.up.pt>*

*© Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente – 2013/2014 – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*



*"Para sabermos bem as coisas, é preciso sabermos os pormenores, e como estes são quase infinitos, os nossos conhecimentos são sempre superficiais e imperfeitos."*

*François de La Rochefoucauld*

*Aos meus pais e à minha irmã,  
por serem os pilares da minha vida,  
e por todo o amor, carinho, compreensão e apoio  
que me deram ao longo destes vinte e três anos.*



## AGRADECIMENTOS

Ao chegar ao fim desta etapa, uma das mais importantes e difíceis da minha vida, não esqueço o apoio e incentivo de uma série de pessoas, sem as quais não teria sido bem sucedida. Àqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização desta dissertação e conclusão desta longa caminhada, endereço o meu profundo agradecimento.

À minha orientadora, Professora Doutora Joana Maia Dias, pelo apoio e incentivo, pelo acompanhamento e disponibilidade permanentes, pelas pertinentes sugestões que certamente ajudaram a melhorar este trabalho e pela correção atenta do mesmo. Agradeço também os meios disponibilizados pelo Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia (LEPABE). Mais, agradeço todos os preciosos conhecimentos que me transmitiu ao longo do curso.

Ao meu coorientador, Professor Mário Cunha, pela disponibilidade permanente, pelos conhecimentos transmitidos, pela colaboração na realização deste trabalho, pelas pertinentes sugestões e pelo interesse demonstrado pela temática desenvolvida. Agradeço ainda a disponibilização de material necessário à realização deste trabalho.

Ao Eng<sup>o</sup>. Rui Pedro Pires, meu orientador na empresa Ambisousa, por ter incentivado e permitido a realização desta dissertação na empresa, pela sua disponibilidade, pela orientação no trabalho e pela disponibilização de todos os meios necessários à sua concretização.

À Ambisousa, por ter permitido a realização desta dissertação e ter apoiado o seu desenvolvimento, com recursos humanos e financeiros.

Ao Professor Manuel Afonso Magalhães da Fonseca Almeida, pelos sábios conhecimentos que me transmitiu e pela sua opinião sempre pertinente.

Ao Eng<sup>o</sup>. Ricardo Gonçalves, da Ambisousa, pela disponibilidade e simpatia com que sempre me recebeu, pela disponibilização de meios necessários à realização deste trabalho e pelo precioso contributo na aquisição de matéria-prima.

À Eng<sup>a</sup>. Célia Almeida, da Resinorte, pela disponibilização de uma grande quantidade de matéria orgânica proveniente da Central de Tratamento Mecânico e Biológico, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

À Eng<sup>a</sup>. Sílvia Cardinal Pinho, pela disponibilização de material de laboratório e de Normas essenciais à realização dos ensaios laboratoriais, e também pelos preciosos conhecimentos laboratoriais transmitidos ao longo do curso.

À Professora Doutora Olga Pastor Nunes, pela disponibilização do laboratório de microbiologia e pelos conhecimentos que me transmitiu nessa área ao longo do curso.

À Eng<sup>a</sup>. Liliana Pereira, do Laboratório de Ciências do Ambiente, às Técnicas do Laboratório de Microbiologia e ao Sr. Ramiro, do Laboratório de Minas, pela ajuda na realização de algumas

análises, pela cedência de materiais necessários à sua concretização e pela disponibilidade e simpatia com que sempre me receberam.

Ao Sr. Marcos, Sr. Ângelo e Sr. Severino, funcionários da Ambisousa, pelo precioso auxílio prestado na manipulação das pilhas de compostagem, pela companhia e pela simpatia e boa disposição com que sempre concretizaram as tarefas necessárias.

À Rute Teixeira, minha grande amiga, pelos bons momentos vividos juntas, pela preciosa partilha de conhecimentos e vivências, pela sua constante boa disposição e pelo apoio e motivação que sempre me deu.

À Isaura Pinto, por todo o apoio que me deu ao longo do curso e por todo o carinho e amizade.

À Raquel Pinho e ao Tiago Lança, da Universidade Itinerante do Mar 2010 e da Escola Naval, pela amizade, pelos inesquecíveis momentos que vivemos juntos e, por convosco, ter descoberto que o mar será sempre a minha segunda casa.

À Joana Félix, pela grande amizade que nos une, por todo o carinho com que sempre me recebeu, pela atenção, pelo apoio, pela motivação e pelo incentivo que sempre me deu. Pelos bons momentos passados juntas, pelas viagens, pelos passeios, enfim, por ter sido como uma irmã sempre que precisei.

Por fim, e mais importante, quero agradecer:

Aos meus pais, Alzira e Justino, por todo o amor e carinho com que me fizeram crescer, pela educação que sempre me proporcionaram, pelo apoio incondicional, pela confiança que sempre depositaram em mim e no meu trabalho e por me mostrarem desde sempre o verdadeiro significado de família. Agradeço também a paciência que tiveram comigo ao longo destes últimos meses, e a preciosa ajuda que deram na realização desta dissertação.

À minha querida irmã, Joana, pela amizade que nos une, pela cumplicidade, pelo amor e carinho, pelo apoio incondicional que sempre me deu, por confiar sempre em mim e no meu trabalho e por ser a minha grande companheira da vida. Agradeço ainda a ajuda que me deu na realização desta dissertação.

Ao António, pelo apoio incondicional que sempre me dá, pelo amor e carinho, pela cumplicidade que nos une, pelo companheirismo, pela qualidade musical que me proporciona e pela imensa felicidade que traz à minha vida.

Ao Barata, pela amizade, pelo apoio, pela motivação, pela prontidão com que sempre me ajudou e por me ter desenrascado em muitos momentos da realização desta dissertação.

À minha avó Corina, por pacientemente me ter ajudado a separar seletivamente os resíduos orgânicos de que necessitei na realização desta dissertação e pelo seu apoio.

À minha avó Quina, por ser uma lutadora na vida e um verdadeiro exemplo a seguir.

Ao Blue, o melhor amigo que um ser humano pode ter.

A todos o meu sincero OBRIGADA.



# RESUMO

Face à elevada representatividade da fração orgânica biodegradável nos resíduos urbanos, e tendo em conta as metas de redução da deposição em aterro destes resíduos, a atingir até 2020 de acordo com o Decreto-Lei n.º 183/2009 de 17 de julho, a empresa Ambisousa tem vindo a explorar medidas que promovam a valorização destes resíduos para que diminua a sua quantidade em aterro e, consequentemente, os problemas associados à sua deposição. Neste sentido, a presente dissertação teve como principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da aplicação de processos de compostagem centralizada e doméstica, como forma de desviar os resíduos urbanos biodegradáveis de aterro.

Desenvolveram-se dois estudos experimentais, sendo um representativo de compostagem centralizada, usando um sistema não-reator (pilhas revolvidas, 3 réplicas de duas condições de operação), que operou com resíduos orgânicos provenientes de uma estação de tratamento mecânico-biológico, e outro representativo de compostagem doméstica, com compostores domésticos distribuídos pela empresa, utilizando resíduos domésticos aplicáveis (3 réplicas).

No estudo do sistema não-reator, que teve a duração de 66 dias, pretendeu-se estudar de que forma o revolvimento influenciava o processo. Para tal, simularam-se dois processos: (1) revolvimento efetuado de 2 em 2 semanas; e, (2) revolvimento efetuado conforme variação da temperatura. Foi realizada a monitorização da temperatura do processo em diferentes pontos das pilhas, tendo-se verificado que em ambos os processos as temperaturas oscilaram dentro da mesma gama de valores, embora no processo 2 tenham sido mais elevadas durante mais tempo. Neste mesmo processo, a variação da temperatura apresentou um comportamento claramente descendente e regular ao longo do tempo. Concluiu-se assim que o revolvimento influencia a forma como as temperaturas variam, bem como a gama de temperaturas a que o processo decorre. No caso da compostagem doméstica, o processo durou 82 dias, e foram utilizadas as tradicionais condições para a sua realização, sendo os resíduos adicionados ao longo do tempo. Verificou-se que não se conseguiram atingir temperaturas superiores a 32 °C.

Relativamente à análise do composto obtido no final de cada processo (tendo em consideração o horizonte temporal definido) verificou-se que nenhum dos compostos produzidos se encontra devidamente estabilizado e maturado, não cumprindo por isso, com alguns parâmetros de controlo de qualidade dos compostos, nomeadamente o teor de humidade, concentração de *E. Coli* e pH, de acordo com as “Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto”. Nenhum composto apresentou fitotoxicidade, de acordo com *Gutezeichen Kompost* RAL-GZ 251.

Da elaboração deste trabalho, e na perspetiva da empresa, conclui-se que é necessária uma otimização dos compostores utilizados para que o processo de compostagem doméstica seja eficaz no desvio de RUB de aterro e na produção de um composto qualificado. No que se refere aos resíduos orgânicos que no futuro resultarão do tratamento mecânico aplicado aos resíduos urbanos provenientes de recolha indiferenciada, os mesmos poderão ser valorizados recorrendo à compostagem em pilhas revolvidas, necessitando no entanto de otimização de alguns parâmetros, bem como de um controlo permanente dos parâmetros de monitorização, para que o composto produzido tenha qualidade para ser comercializado.

**Palavras-Chave:** Resíduos orgânicos; Compostagem doméstica; Compostagem centralizada; Composto.

# ABSTRACT

Given the high representation of the organic biodegradable fraction in municipal wastes and having in mind the targets towards the reduction of the disposal of such wastes in landfill, to be achieved by 2020 as set by Decree-Law no. 183/2009 of 17<sup>th</sup> July, the company Ambisousa has been exploring measures to promote the recovery of these wastes to diminish their quantity in landfill and therefore the problems associated with their disposal. In this sense, the present dissertation had as main objective to evaluate the technical feasibility of applying centralized and home composting processes as a means of diverting biodegradable municipal waste from landfill.

Two experimental studies were developed, one representing the centralized composting, in a non-reactor system (windrows, 3 replicas of two operational conditions), using organic wastes from a mechanical-biological treatment plant, and another one representing home composting, with domestic composters, provided by the company, using the waste directly from domestic sources (3 replicas).

In the study of the non-reactor system, which lasted 66 days, it was intended to study how the turning frequency influenced the process. For this purpose, two processes were simulated: (1) the turning performed each 2 weeks; and, (2) the turning performed according to temperature variation. The monitoring of the process took place in different points of the piles and it was found that in both processes temperatures varied within the same range of values, though in process 2 temperatures were higher for longer. In this same process, temperature variation presented a clearly descending and regular behavior over time. It could be concluded that the turning influences the way temperatures vary, as well as the interval of temperatures at which the process happens. In the case of the home composting, the process lasted 82 days, and the traditional conditions were used to process it by adding wastes over time. It was observed that temperatures never reached values higher than 32 °C.

In what concerns the analysis of the compost obtained at the end of each process (taking into account the defined time horizon) it was found that none of the composts produced is properly stabilized and matured, thus not fitting in the quality control parameters of the composts, in particular the moisture content, concentration of *E. Coli* and pH, according to the "Technical Specifications about Quality and Usages of the Compost". None compost presented phytotoxicity according to *Gutezeichen Kompost* RAL-GZ 251.

By doing this work, and from the perspective of the Company, it was concluded that an optimization of the used composters is required so that the process of home composting can be effective in diverting biodegradable municipal waste from landfill and also in the production of qualified compost. In what regards the organic waste, which in the future will result from mechanical treatment applied to municipal waste from an non-segregated collection, this may be recovered by using the composing windrows, requiring however the optimization of some parameters, as well as the continuous monitoring of the parameters at the facility, so that the resulting compost has the quality to be commercialized.

**Keywords:** Organic wastes; Home composting; Centralized composting; Compost.

# ÍNDICE

|          |                                                                                            |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1.     | GESTÃO DE RESÍDUOS URBANOS EM PORTUGAL .....                                               | 1         |
| 1.1.1.   | <i>Entidades Gestoras dos Resíduos Urbanos.....</i>                                        | <i>4</i>  |
| 1.1.2.   | <i>Produção de Resíduos Urbanos .....</i>                                                  | <i>6</i>  |
| 1.1.3.   | <i>Caracterização Física dos Resíduos Urbanos.....</i>                                     | <i>8</i>  |
| 1.1.4.   | <i>Destino dos Resíduos Urbanos.....</i>                                                   | <i>9</i>  |
| 1.2.     | GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS BIODEGRADÁVEIS .....                              | 11        |
| 1.3.     | COMPOSTAGEM .....                                                                          | 13        |
| 1.3.1.   | <i>Perspetiva Histórica .....</i>                                                          | <i>13</i> |
| 1.3.2.   | <i>Conceitos .....</i>                                                                     | <i>14</i> |
| 1.3.3.   | <i>Objetivos, Vantagens e Desvantagens.....</i>                                            | <i>15</i> |
| 1.3.4.   | <i>Descrição geral do processo .....</i>                                                   | <i>16</i> |
| 1.3.5.   | <i>Controlo do processo.....</i>                                                           | <i>18</i> |
| 1.3.5.1. | <i>Microrganismos .....</i>                                                                | <i>19</i> |
| 1.3.5.2. | <i>Parâmetros Físicos.....</i>                                                             | <i>20</i> |
|          | <i>Temperatura .....</i>                                                                   | <i>20</i> |
|          | <i>Humidade.....</i>                                                                       | <i>22</i> |
|          | <i>Odores .....</i>                                                                        | <i>22</i> |
|          | <i>Porosidade, estrutura, textura e tamanho das partículas .....</i>                       | <i>24</i> |
| 1.3.5.3. | <i>Parâmetros Químicos .....</i>                                                           | <i>25</i> |
|          | <i>pH .....</i>                                                                            | <i>25</i> |
|          | <i>Razão C:N .....</i>                                                                     | <i>26</i> |
|          | <i>Arejamento e disponibilidade de oxigénio.....</i>                                       | <i>27</i> |
| 1.3.6.   | <i>Tecnologias de Compostagem .....</i>                                                    | <i>28</i> |
| 1.3.7.   | <i>O composto.....</i>                                                                     | <i>29</i> |
| 1.4.     | COMPOSTAGEM DOMÉSTICA .....                                                                | 34        |
| 1.5.     | A AMBISOUA .....                                                                           | 36        |
| 1.6.     | OBJETIVOS.....                                                                             | 39        |
| 1.7.     | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                                                              | 39        |
| <b>2</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                                    | <b>41</b> |
| 2.1.     | MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....                                                              | 41        |
| 2.1.1.   | <i>Matérias-primas.....</i>                                                                | <i>41</i> |
| 2.1.2.   | <i>Compostores .....</i>                                                                   | <i>42</i> |
| 2.1.3.   | <i>Armazenamento, transporte e preparação dos resíduos a colocar nos compostores .....</i> | <i>43</i> |
| 2.1.4.   | <i>Transporte dos resíduos a colocar nas pilhas e montagem das mesmas .....</i>            | <i>44</i> |
| 2.1.5.   | <i>Amostragem .....</i>                                                                    | <i>44</i> |
| 2.1.6.   | <i>Monitorização do processo e determinação da qualidade do composto .....</i>             | <i>44</i> |
| 2.2.     | MÉTODOS .....                                                                              | 46        |
| 2.2.1.   | <i>Montagem dos compostores domésticos .....</i>                                           | <i>46</i> |
| 2.2.2.   | <i>Preparação e adição de resíduos aos compostores.....</i>                                | <i>46</i> |
| 2.2.3.   | <i>Construção das pilhas de compostagem.....</i>                                           | <i>47</i> |
| 2.2.3.1. | <i>Preparação das matérias-primas .....</i>                                                | <i>47</i> |
| 2.2.3.2. | <i>Dimensionamento das pilhas .....</i>                                                    | <i>48</i> |
| 2.2.3.3. | <i>Construção das pilhas.....</i>                                                          | <i>49</i> |
| 2.2.4.   | <i>Amostragem .....</i>                                                                    | <i>50</i> |
| 2.2.5.   | <i>Monitorização do processo .....</i>                                                     | <i>51</i> |

|           |                                                                           |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.5.1.  | Temperatura .....                                                         | 51        |
| 2.2.5.2.  | Revolvimento .....                                                        | 52        |
| 2.2.5.3.  | Teor de Humidade .....                                                    | 52        |
| 2.2.6.    | <i>Análises físico-químicas dos resíduos e do composto produzido.....</i> | <i>53</i> |
| 2.2.6.1.  | Teor de Humidade .....                                                    | 53        |
| 2.2.6.2.  | Determinação do pH.....                                                   | 54        |
| 2.2.6.3.  | Determinação da Condutividade .....                                       | 54        |
| 2.2.6.4.  | Determinação da Matéria Orgânica .....                                    | 55        |
| 2.2.6.5.  | Análise Granulométrica .....                                              | 55        |
| 2.2.6.6.  | Análises de Fitotoxicidade.....                                           | 56        |
| 2.2.6.7.  | Análises Microbiológicas .....                                            | 57        |
| <b>3</b>  | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                       | <b>61</b> |
| 3.1.      | MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM .....                            | 61        |
| 3.1.1.    | <i>Temperatura .....</i>                                                  | <i>61</i> |
| 3.1.2.    | <i>Humidade .....</i>                                                     | <i>67</i> |
| 3.2.      | QUALIDADE DO COMPOSTO.....                                                | 69        |
| 3.2.1.    | <i>Humidade .....</i>                                                     | <i>69</i> |
| 3.2.2.    | <i>Granulometria.....</i>                                                 | <i>70</i> |
| 3.2.3.    | <i>Matéria Orgânica.....</i>                                              | <i>71</i> |
| 3.2.4.    | <i>Metais pesados .....</i>                                               | <i>72</i> |
| 3.2.5.    | <i>pH.....</i>                                                            | <i>73</i> |
| 3.2.6.    | <i>Condutividade .....</i>                                                | <i>74</i> |
| 3.2.7.    | <i>Análises Microbiológicas – Escherichia Coli .....</i>                  | <i>75</i> |
| 3.2.8.    | <i>Fitotoxicidade .....</i>                                               | <i>77</i> |
| <b>4</b>  | <b>ANÁLISE CRÍTICA .....</b>                                              | <b>79</b> |
| <b>5</b>  | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                   | <b>81</b> |
| <b>6</b>  | <b>PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                | <b>85</b> |
| <b>7</b>  | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                    | <b>87</b> |
| <b>8</b>  | <b>ANEXOS .....</b>                                                       | <b>93</b> |
| Anexo I   | Microrganismos intervenientes no processo de compostagem .....            | 93        |
| Anexo II  | Tecnologias da Compostagem.....                                           | 99        |
| Anexo III | Características físicas, químicas e biológicas do composto .....          | 107       |
| Anexo IV  | Tipos de Compostores .....                                                | 109       |
| Anexo V   | Dados estatísticos da Ambisousa .....                                     | 111       |
| Anexo VI  | Análises de Fitotoxicidade .....                                          | 115       |

# ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Dimensões da Gestão de Resíduos (Adaptado de Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR) 2011-2020 <sup>[3]</sup> ).....                                                                         | 1  |
| <b>Figura 2</b> – Hierarquia da gestão de resíduos (Adaptado de Lipor <sup>[7]</sup> ).....                                                                                                                        | 3  |
| <b>Figura 3</b> – Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (Adaptado de APA <sup>[6]</sup> ).....                                                                                                                    | 5  |
| <b>Figura 4</b> – a) Associação de Sistemas para a Gestão de Resíduos Urbanos Biodegradáveis em Portugal Continental; b) Unidades de Valorização Orgânica (Adaptado de APA <sup>[6]</sup> ).....                   | 6  |
| <b>Figura 5</b> – Produção e Capitação de RU em Portugal Continental (Fonte: Relatório de Estado do Ambiente (REA) 2013 <sup>[13]</sup> ).....                                                                     | 7  |
| <b>Figura 6</b> – Produção de RU em Portugal Continental, por região (quantidade à esquerda e distribuição percentual à direita) e respetiva capitação (esquerda), em 2012 (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup> )..... | 8  |
| <b>Figura 7</b> – Caracterização física dos RU produzidos em Portugal, em 2012 (Fonte: Relatório Anual de Resíduos Urbanos (RARU) 2012 <sup>[10]</sup> ).....                                                      | 9  |
| <b>Figura 8</b> – Destino direto dos RU produzidos em Portugal Continental, em 2012 (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup> ).....                                                                                        | 10 |
| <b>Figura 9</b> – Quantitativos de RU encaminhados para as diversas operações de gestão (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup> ).....                                                                                    | 11 |
| <b>Figura 10</b> – Destino final dos RUB, em 2012 (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup> ).....                                                                                                                          | 12 |
| <b>Figura 11</b> – Fluxo material de um processo de compostagem convencional (Adaptado de <i>Manure Composting Manual</i> <sup>[26]</sup> ).....                                                                   | 17 |
| <b>Figura 12</b> – Perfil típico de temperaturas ao longo do processo de compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[20]</sup> ).....                                                                               | 18 |
| <b>Figura 13</b> – Perfil de distribuição de temperaturas típico de uma pilha de compostagem <sup>[37]</sup> .....                                                                                                 | 21 |
| <b>Figura 14</b> – Curva representativa da variação do pH ao longo do processo de compostagem <sup>[35]</sup> .....                                                                                                | 26 |
| <b>Figura 15</b> – Esquema resumo das tecnologias de compostagem mais comuns.....                                                                                                                                  | 29 |
| <b>Figura 16</b> – Metodologia aplicada às atividades experimentais realizadas.....                                                                                                                                | 41 |
| <b>Figura 17</b> – Compostor <i>Domplex</i> <sup>[62]</sup> .....                                                                                                                                                  | 43 |
| <b>Figura 18</b> – Caixas para deposição e transporte dos resíduos verdes e castanhos.....                                                                                                                         | 43 |
| <b>Figura 19</b> – Visualização do interior dos compostores com cobertura da base com ramos de videira (à esquerda) e com palha na superfície dos resíduos (à direita).....                                        | 47 |
| <b>Figura 20</b> – Formato e dimensões das pilhas de compostagem.....                                                                                                                                              | 49 |
| <b>Figura 21</b> – Local de construção das pilhas de compostagem e modo de mistura dos materiais a incorporar nas mesmas.....                                                                                      | 50 |
| <b>Figura 22</b> – Pontos de medição da temperatura nas pilhas de compostagem e equipamento utilizado para a sua medição em ambos os processos.....                                                                | 51 |
| <b>Figura 23</b> – Revolvimento das pilhas.....                                                                                                                                                                    | 52 |
| <b>Figura 24</b> – Eléctrodo medidor de pH e temperatura ( <i>CRISON pH meter GLP 21</i> ).....                                                                                                                    | 54 |
| <b>Figura 25</b> – Eléctrodo medidor de condutividade ( <i>CRISON conductimeter GLP 31</i> ).....                                                                                                                  | 54 |
| <b>Figura 26</b> – Agitador magnético ( <i>Heidolph MR 3000 D</i> ) (à esquerda); Decantação do composto dentro de um frasco Schott (à direita).....                                                               | 58 |
| <b>Figura 27</b> – Materiais utilizados na filtração das amostras.....                                                                                                                                             | 59 |

|                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 28</b> – Evolução da temperatura (temperaturas médias e barras de erro relativamente ao desvio padrão) no centro dos compostores entre o 10º dia de compostagem e o final do processo. ....        | 62 |
| <b>Figura 29</b> – Evolução da temperatura no processo de compostagem 1 e 2 (temperaturas médias e barras de erro relativamente ao desvio padrão) entre o 7º dia de compostagem e o final do processo. ....  | 63 |
| <b>Figura 30</b> – Variação média da temperatura na superfície, no meio e na base das pilhas do processo 1 (com coeficiente de variação inferior a 22,1 %). ....                                             | 66 |
| <b>Figura 31</b> – Variação média da temperatura na superfície, no meio e na base das pilhas do processo 2 (com coeficiente de variação inferior a 33,1 %). ....                                             | 67 |
| <b>Figura 32</b> – Agregados de matéria orgânica e vidro (à esquerda); Agregados de matéria orgânica na superfície das pilhas de compostagem (à direita). ....                                               | 71 |
| <b>Figura 33</b> – Resultados do teste de fitotoxicidade, avaliado através da comparação da produção de matéria seca (g) da cultura de azevém instalado em substratos com doses crescentes de composto. .... | 77 |

# ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> – Vantagens e desvantagens da compostagem <sup>[21, 22, 25, 26]</sup> .....                                                                                                                                                                                                              | 16 |
| <b>Tabela 2</b> – Parâmetros a verificar ao longo do processo de compostagem – temperatura, tempo de tratamento e números de revolvimentos (Adaptado de <i>European Commission – Directorate-General Environment</i> <sup>[49]</sup> ) .....                                                             | 31 |
| <b>Tabela 3</b> – Valores máximos admissíveis para os teores de metais pesados (Adaptado de “ <i>Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft</i> ” <sup>[49]</sup> e de “ <i>Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto</i> ” <sup>[51]</sup> ) .....                            | 32 |
| <b>Tabela 4</b> – Valores máximos admissíveis para impurezas ou materiais inertes antropogénicos e pedras (Adaptado de “ <i>Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft</i> ” <sup>[49]</sup> e de “ <i>Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto</i> ” <sup>[51]</sup> ) ..... | 33 |
| <b>Tabela 5</b> – Categorias de composto em função do grau de maturação (Adaptado de “ <i>Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto</i> ” <sup>[51]</sup> ) .....                                                                                                                | 33 |
| <b>Tabela 6</b> – Valores máximos admissíveis para teores de metais pesados no composto com rótulo ecológico (Adaptado de Comité do Rótulo Ecológico da União Europeia <sup>[53, 54]</sup> ) .....                                                                                                       | 34 |
| <b>Tabela 7</b> – Matérias-primas utilizadas nos ensaios de compostagem doméstica de acordo com a sua proveniência e tipo. ....                                                                                                                                                                          | 42 |
| <b>Tabela 8</b> – Material e equipamento utilizado para monitorização do processo e determinação da qualidade do composto. ....                                                                                                                                                                          | 45 |
| <b>Tabela 9</b> – Massa volúmica e humidade dos resíduos utilizados <sup>[41, 63]</sup> .....                                                                                                                                                                                                            | 48 |
| <b>Tabela 10</b> – Caracterização teórica da mistura de resíduos. ....                                                                                                                                                                                                                                   | 48 |
| <b>Tabela 11</b> – Proporções de composto e turfa utilizadas em cada vaso. ....                                                                                                                                                                                                                          | 56 |
| <b>Tabela 12</b> – Designação das amostras analisadas. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 61 |
| <b>Tabela 13</b> – Resultados da monitorização do teor de Humidade. ....                                                                                                                                                                                                                                 | 68 |
| <b>Tabela 14</b> – Massa total de amostra analisada e quantidade de amostra retida em cada peneiro. ....                                                                                                                                                                                                 | 70 |
| <b>Tabela 15</b> – Percentagem de amostra retida em cada peneiro. ....                                                                                                                                                                                                                                   | 71 |
| <b>Tabela 16</b> – Teor médio de matéria orgânica na mistura inicial de resíduos e nos compostos produzidos. ....                                                                                                                                                                                        | 72 |
| <b>Tabela 17</b> – Concentração de metais pesados nas amostras dos 3 compostos produzidos. ....                                                                                                                                                                                                          | 73 |
| <b>Tabela 18</b> – pH médio da mistura inicial e dos compostos produzidos. ....                                                                                                                                                                                                                          | 74 |
| <b>Tabela 19</b> – Condutividade média dos compostos obtidos. ....                                                                                                                                                                                                                                       | 74 |
| <b>Tabela 20</b> – Resultados das análises microbiológicas – <i>Escherichia Coli</i> . ....                                                                                                                                                                                                              | 75 |
| <b>Tabela 21</b> – Resumo dos resultados obtidos nos parâmetros analisados e comparação com os valores especificados nas Especificações Técnicas. ....                                                                                                                                                   | 76 |

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**APA** – Agência Portuguesa do Ambiente  
**C/N** – Razão Carbono/Azoto  
**COV** – Compostos Orgânicos Voláteis  
**EGF** – Empresa Geral de Fomento  
**EIM** – Empresa Intermunicipal  
**ETAR** – Estação de Tratamento de Águas Residuais  
**FEUP** – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
**INIAP** – Instituto Nacional de Investigação Agrária e das Pescas  
**LEPABE** – Laboratório de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia  
**LQARS** – Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva  
**MO** – Matéria Orgânica  
**NMP** – Número Mais Provável  
**PEAD** – Polietileno de Alta Densidade  
**PERSU** – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos  
**PNGR** – Plano Nacional de Gestão de Resíduos  
**PPRU** – Plano de Prevenção de Resíduos Urbanos  
**RARU** – Relatório Anual de Resíduos Urbanos  
**RCD** – Resíduos de Construção e Demolição  
**REA** – Relatório de Estado do Ambiente  
**RSU** – Resíduos Sólidos Urbanos  
**RU** – Resíduos Urbanos  
**RUB** – Resíduos Urbanos Biodegradáveis  
**SGRU** – Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos  
**SPV** – Sociedade Ponto Verde  
**UFC** – Unidades Formadoras de Colónias  
**UTAD** – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro  
**UV** – Ultravioleta  
**VMA** – Valor Máximo Admissível



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. GESTÃO DE RESÍDUOS URBANOS EM PORTUGAL

Consequência das atividades humanas, os resíduos, que assumem tantas formas, composição variada, propriedades físicas e químicas distintas ou até mesmo heterogéneo comportamento, constituem uma problemática de âmbito nacional. Para que os seus potenciais efeitos sobre o ambiente e a saúde pública sejam minimizados, é fundamental a implementação de um sistema de gestão adequado. A gestão de resíduos compreende a recolha, o transporte, a valorização e a eliminação dos resíduos, incluindo o planeamento e a fiscalização destas operações, a monitorização e manutenção dos locais de eliminação após o encerramento e ainda as medidas adotadas na qualidade de comerciante ou corretor, tal como referido no Decreto-Lei n.º 73/2011, que altera e republica o Decreto-Lei n.º 178/2006 <sup>[1, 2]</sup>. A prevenção da produção de resíduos, as políticas ambientais e a regulação das atividades de gestão de resíduos são também parte integrante da Gestão de Resíduos, como se ilustra na Figura 1.



**Figura 1** – Dimensões da Gestão de Resíduos (Adaptado de Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR) 2011-2020 <sup>[3]</sup>).

Em Portugal, a primeira aprovação de um quadro legal, em matéria de gestão de resíduos remonta a 25 de Novembro de 1985, através do Decreto-Lei n.º 488. Na atualidade, o Decreto-Lei n.º 73/2011 vem alterar e republicar o regime geral da gestão de resíduos em vigor, o Decreto-Lei n.º 178/2006 (que transpõe a Diretiva 2006/12/CE, de 5 de Abril), transpondo para

o ordenamento jurídico interno a Diretiva 2008/98/CE, de 19 de Novembro, relativa à gestão de resíduos.

A gestão de resíduos tem como principais objetivos os seguintes <sup>[4, 5]</sup>:

- Garantir a qualidade de vida do Homem e do Ambiente através de operações adequadas;
- Fomentar um sistema sólido de gestão de resíduos urbanos (RU) que contribua para a preservação dos recursos naturais;
- Implementar condições que permitam o acompanhamento e resposta dos sistemas de gestão ao desenvolvimento económico e social das regiões;
- Valorizar os recursos associados aos resíduos, por forma a reduzir a quantidade de resíduos a encaminhar para operações de eliminação;
- Melhorar a eficiência do serviço prestado;
- Integrar as soluções num quadro de ações que permita assegurar o cumprimento das metas comunitárias e nacionais previstas.

Sobrepõem-se a estes, e de acordo com o Decreto-Lei n.º 178/2006, o objetivo fundamental de evitar e reduzir a produção de resíduos bem como o seu carácter nocivo, evitando ou reduzindo assim o risco para a saúde pública e para o ambiente <sup>[4]</sup>.

Embora haja objetivos bem definidos acerca daquilo que deve ser um sistema de gestão de resíduos e sobre o que o mesmo deve acautelar, esta é ainda uma tarefa problemática devido essencialmente a fatores como <sup>[6]</sup>:

- Taxa crescente de produção de resíduos *per capita* e diminuição dos potenciais locais para a sua eliminação;
- Elevado custo das medidas de prevenção e minimização;
- Dificuldades em mudar a filosofia e a estrutura dos sistemas de gestão de resíduos existentes;
- Elevada quantidade de agentes envolvidos nos processos relativos aos planos de gestão de resíduos, o que dificulta o consenso.

Em Portugal, existem em geral soluções com vista à implementação de sistemas de gestão integrada de resíduos. Sempre que possível e adequado, tendo em consideração fatores de índole técnica e ambiental, estes sistemas devem ser concebidos por forma a respeitar uma hierarquia de prioridades, definida no Decreto-Lei n.º 73/2011 (artigo 7.º), que está representada na Figura 2.



**Figura 2** – Hierarquia da gestão de resíduos (Adaptado de Lipor <sup>[7]</sup>).

Este modelo de gestão assegura que os resíduos são encarados como recursos, sendo a primeira opção de gestão a prevenção. A reutilização, reciclagem ou outras formas de valorização são opção quando a opção anterior não é aplicável. A eliminação definitiva de resíduos surge então como a última opção de gestão, uma vez que implica a perda de recursos e uma responsabilidade ambiental e pública futura, justificando-se apenas quando todas as anteriores opções são técnica e financeiramente inviáveis <sup>[8]</sup>.

O modelo português de gestão de resíduos assenta em 7 princípios gerais, de acordo com o Decreto-Lei n.º 73/2011 <sup>[9]</sup>: (1) o da auto-suficiência e da proximidade, que estabelece que a gestão de resíduos deve ocorrer preferencialmente no território nacional, evitando a movimentação transfronteiriça, e em instalações adequadas e que recorram a tecnologias e métodos apropriados para assegurar a proteção do ambiente e da saúde pública; (2) o da responsabilidade pela gestão, que é atribuída ao produtor inicial do resíduo, podendo ser imputada total ou parcialmente ao produtor do produto que deu origem aos resíduos e partilhada pelos distribuidores desse produto; (3) o da proteção da saúde humana e do ambiente, que estabelece como objetivo prioritário da política da gestão de resíduos evitar e reduzir a sua produção bem como o seu carácter nocivo; (4) o da hierarquia das operações de gestão de resíduos, já referido anteriormente neste capítulo; (5) o da responsabilidade do cidadão, que prevê que os cidadãos adotem comportamentos preventivos no que respeita à produção de resíduos, assim como práticas que facilitem a reutilização e valorização; (6) o da regulação da gestão de resíduos que prevê a obrigatoriedade de licenciamento para determinadas ações de gestão; e, por fim, (7) o princípio da equivalência que estabelece o regime económico e financeiro das atividades de gestão de resíduos.

Nos dias de hoje a consciência de que a responsabilidade da gestão dos resíduos deve ser partilhada é cada vez mais clara. Esta partilha é feita do produtor ao consumidor, do produtor ao detentor e dos operadores de gestão às autoridades administrativas reguladoras, como referido no Decreto-Lei n.º 73/2011 <sup>[9]</sup>. Surgem assim em Portugal os sistemas de gestão de resíduos urbanos (SGRU), sob responsabilidade de entidades gestoras de resíduos urbanos.

No que respeita aos custos inerentes às atividades de gestão de resíduos é aplicado o princípio poluidor-pagador, que determina a responsabilização prioritária dos produtores de bens de consumo e de resíduos ou dos detentores dos mesmos <sup>[8]</sup>.

O organismo legal tutelado pelo Ministério do Ambiente para assegurar e acompanhar a implementação de uma estratégia nacional para os resíduos é a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Existem também as Autoridades Regionais dos Resíduos, que têm por objetivo assegurar o cumprimento das competências em matéria de Gestão de Resíduos, em proximidade com os operadores <sup>[8]</sup>.

### **1.1.1. ENTIDADES GESTORAS DOS RESÍDUOS URBANOS**

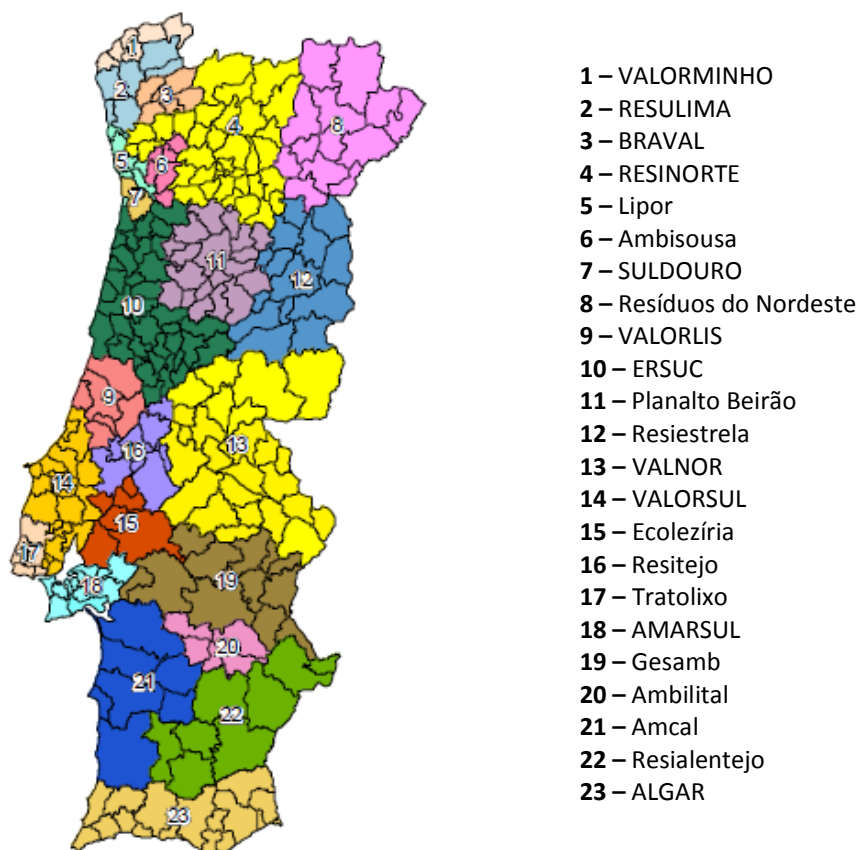
Segundo o Decreto-Lei n.º 178/2006, os RU são aqueles que provêm de habitações, bem como os que, pela sua natureza ou composição, são semelhantes a estes.

Em Portugal, a organização do setor de RU está associada historicamente ao municipalismo, pela sua proximidade e ligação à salvaguarda da saúde pública e ambiental. Até ao início dos anos 90, os RU eram depositados em lixeiras a céu aberto, sendo por vezes queimados para reduzir o volume por si ocupado, sem qualquer tipo de controlo ambiental ou de saúde pública. As exigências ao nível comunitário e a necessidade de investir fortemente em infraestruturas de grandes dimensões, determinaram a ultrapassagem das fronteiras de cada município no que respeita ao modelo organizacional da gestão de resíduos. Assim, nos anos 90 surgiram os primeiros sistemas multimunicipais que operavam a gestão de resíduos em alta, investindo em infraestruturas com vantagens de economias de escala e custos de operação. Nessa altura, assistiu-se a um incremento da implementação da recolha seletiva de resíduos, de novas infraestruturas de tratamento e destino final de resíduos e iniciou-se uma árdua caminhada no encerramento e recuperação de lixeiras, onde os resíduos foram durante longos anos depositados sem qualquer tipo de triagem ou controlo <sup>[5]</sup>.

No nosso país, a gestão dos RU é da responsabilidade dos municípios, no entanto, a exploração e gestão podem ser efetuadas por Sistemas Municipais/Intermunicipais ou Sistemas Multimunicipais. Os Sistemas Municipais/Intermunicipais (municípios ou associação de municípios) podem gerir diretamente os resíduos ou concessionar a gestão, através de concurso público, a entidades públicas ou privadas de natureza empresarial. Por sua vez, os Sistemas Multimunicipais são sociedades concessionárias de capital maioritariamente ou exclusivamente público, às quais o Estado atribui gestão de natureza empresarial dos RU (por exemplo a Empresa Geral de Fomento (EGF) e as autarquias) <sup>[2]</sup>.

Em Portugal Continental, no ano de 2012 existiam 23 sistemas de gestão de RU distribuídos pelo território nacional. Destes, 12 são multimunicipais (em 11 das quais a EGF tem capital

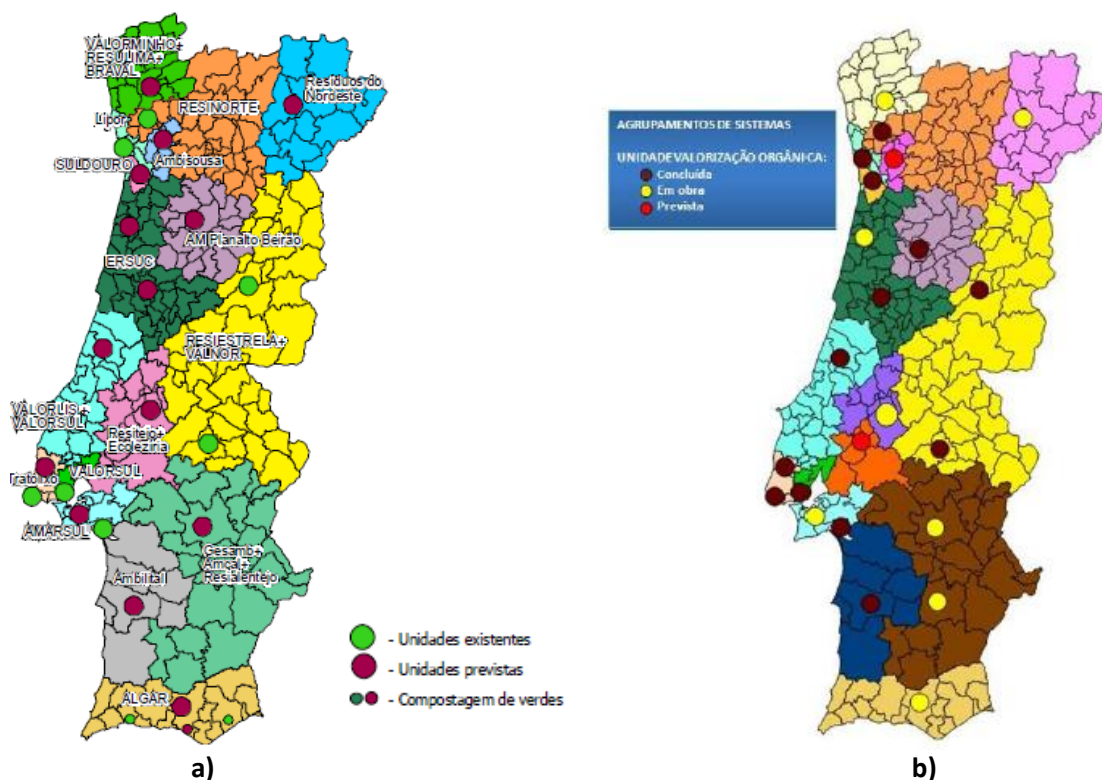
maioritário) e os restantes são municipais/intermunicipais. Cada um destes sistemas possui infraestruturas para assegurar um destino final adequado aos resíduos produzidos na sua área de intervenção <sup>[6]</sup>. Na Figura 3 encontram-se representados geograficamente os sistemas de gestão de RU existentes em Portugal Continental.



**Figura 3** – Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (Adaptado de APA <sup>[6]</sup>).

A heterogeneidade dos sistemas existentes, em termos de municípios abrangidos, dispersão geográfica, demografia e condições socioeconómicas é evidente. Esta característica reflete-se nas opções de recolha e tratamento dos seus resíduos, bem como nos equipamentos e infraestruturas de gestão de resíduos e fluxos de resíduos. Os custos associados à gestão de resíduos são condicionados por todas estas variáveis <sup>[10]</sup>.

Ao longo dos últimos anos tem-se vindo a verificar que o número de infraestruturas tende à estabilização. No entanto, tendo em conta os objetivos propostos pelo Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos, PERSU II 2007-2016, que se referem à diminuição de resíduos biodegradáveis enviados para aterro e o Decreto-Lei n.º 183/2009 de 17 de julho, no qual foram redefinidas as metas de redução de RUB depositados em aterro, para os anos de 2013 e de 2020, para 50 % e 35 % da quantidade de RUB total produzida em 1995, respetivamente, têm vindo a ser implementadas Unidades de Valorização Orgânica, com o principal objetivo de desviar os resíduos de aterro e aumentar a quantidade de resíduos recicláveis recuperados. Assim, em 2011, verificou-se a agregação de alguns SGRU, como se pode observar na Figura 4 a) <sup>[6]</sup>.



**Figura 4 – a)** Associação de Sistemas para a Gestão de Resíduos Urbanos Biodegradáveis em Portugal Continental; **b)** Unidades de Valorização Orgânica (Adaptado de APA <sup>[6]</sup>).

Na Figura 4 b) pode observar-se que em 2011 se encontravam em funcionamento 13 Unidades de Valorização Orgânica, em construção estavam 8 unidades e havia a previsão de serem construídas mais duas <sup>[11]</sup>.

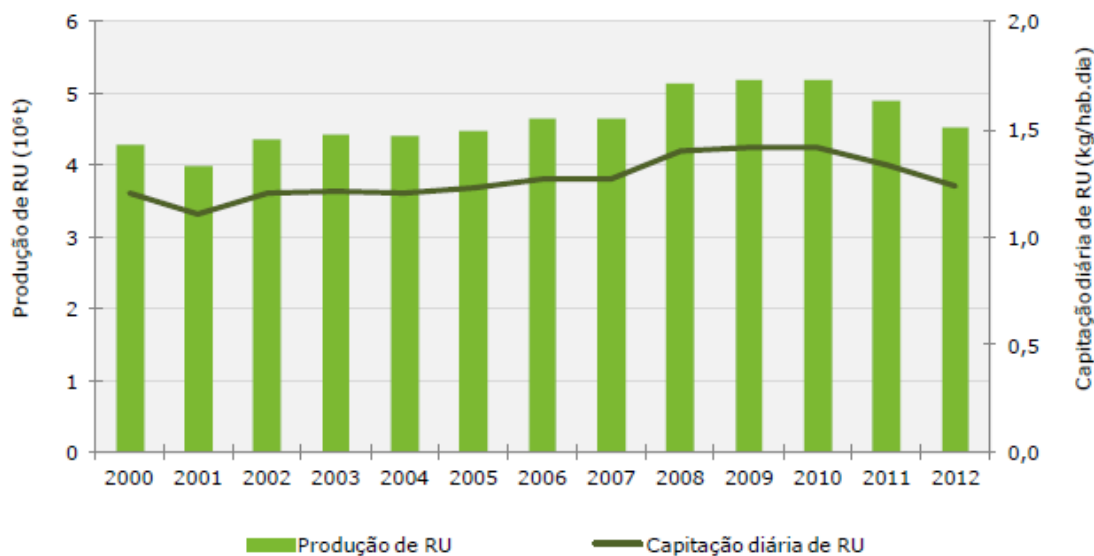
### 1.1.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS

As inúmeras atividades de produção e consumo desenvolvidas no nosso país utilizam recursos naturais que entram no ciclo económico, desempenhando uma determinada função ou serviço. Quando estes recursos deixam de ser utilizáveis ou reaproveitáveis são devolvidos ao meio ambiente, mas sob a forma de resíduos que constituem os desperdícios das referidas atividades. A relação entre os fluxos de entrada de recursos naturais e os fluxos de saída de resíduos das atividades de produção e consumo são afetados essencialmente pela evolução da economia e pelos hábitos das sociedades <sup>[3]</sup>.

O aumento da variedade e especificidade dos produtos à disposição da sociedade leva, evidentemente, a um aumento da produção de resíduos. Simultaneamente, surgem novas tecnologias no sentido de valorizar esses resíduos, aproveitando o seu potencial, e diminuindo dessa forma os impactos decorrentes da produção de resíduos <sup>[12]</sup>.

Estima-se que em 2012, a captação diária por habitante tenha sido de 1,24 kg de resíduos, o que se traduziu na produção de um total de 4,782 milhões de toneladas de resíduos. Relativamente ao ano transato verificou-se uma diminuição da produção total de cerca de 7,4

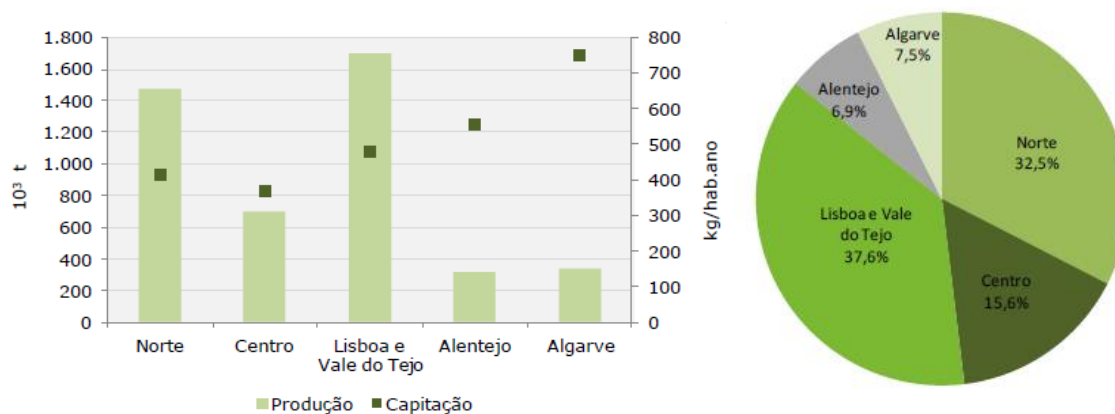
%. Na Figura 5 pode-se verificar que os resultados obtidos em 2012 vêm inverter a tendência verificada até 2010 e já contrariada em 2011, relativamente ao crescimento da produção de resíduos urbanos <sup>[13]</sup>.



**Figura 5** – Produção e Capitação de RU em Portugal Continental (Fonte: Relatório de Estado do Ambiente (REA) 2013 <sup>[13]</sup>).

O decréscimo na produção de resíduos que se tem vindo a verificar desde o ano de 2011 poderá relacionar-se com a crise económica e financeira que Portugal atravessa, o que afeta os hábitos de consumo da população e, consequentemente, a produção de resíduos. Por outro lado, as políticas de gestão de resíduos que têm sido adotadas e implementadas têm também contribuído para a verificação destes valores <sup>[10]</sup>.

Em termos regionais, pode observar-se na Figura 6 que a região de Lisboa e Vale do Tejo foi a que apresentou uma produção de RU mais elevada, cerca de 37,6 %, seguida da região Norte, com 32,5 %. No que respeita à capitação média anual, verificam-se nas regiões do Alentejo e Algarve os valores mais elevados, 555 kg/hab e 750 kg/hab, respetivamente. O facto de estes valores serem tão elevados tem a ver com a existência de uma população flutuante (essencialmente em épocas festivas e nos meses de verão) que não é contabilizada para efeitos de cálculo da capitação <sup>[13]</sup>.



**Figura 6** – Produção de RU em Portugal Continental, por região (quantidade à esquerda e distribuição percentual à direita) e respetiva capitação (esquerda), em 2012 (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup>).

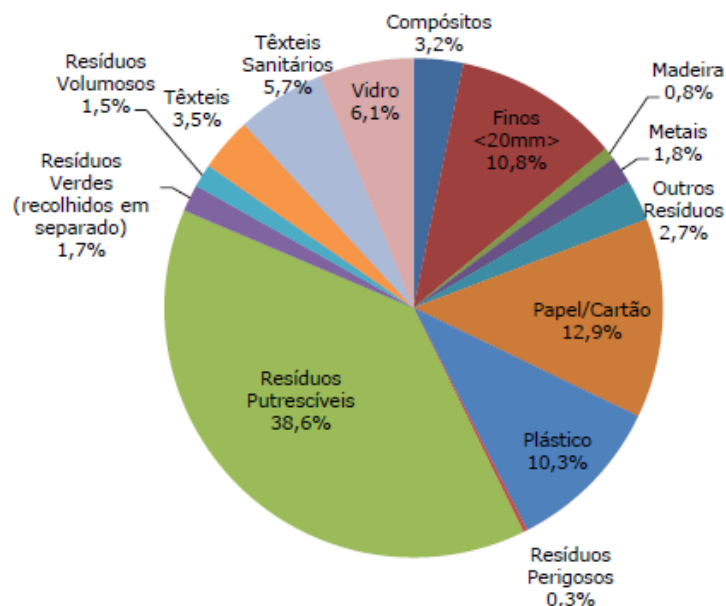
O PERSU II, estabelece os valores de 5,078 e 4,937 milhões de toneladas, para 2012 e 2016, respetivamente, como metas de produção anual de RU em Portugal Continental e nas Regiões Autónomas. O Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos 2009 – 2016 (PPRU) aponta para uma redução de 10 % da capitação média diária, relativamente aos valores de 2007, como sendo a meta a alcançar até 2016. Já o Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho, estabelece como meta a alcançar até 2020, um aumento mínimo global de 50 % em peso relativamente à preparação para reutilização e a reciclagem de resíduos urbanos, bem como um aumento mínimo para 70 % em peso relativamente à preparação para a reutilização, a reciclagem e outras formas de valorização material <sup>[2, 9, 14]</sup>.

No que respeita à diminuição da produção de RU, não só em Portugal mas também no mundo todo, existe ainda um longo caminho a percorrer. A sociedade atual é ainda muito ineficiente na forma como utiliza os recursos materiais, sendo que na atualidade apenas uma ínfima fração destes é reintroduzida no sistema económico.

### 1.1.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS RESÍDUOS URBANOS

A caracterização física dos resíduos urbanos produzidos é fundamental para a definição e implementação de estratégias de gestão de resíduos eficazes. A composição física dos resíduos é afetada por diversos fatores, tais como as características da população e os seus hábitos de consumo. Na Figura 7 apresentam-se os resultados da caracterização física dos RU produzidos no continente, em 2012.





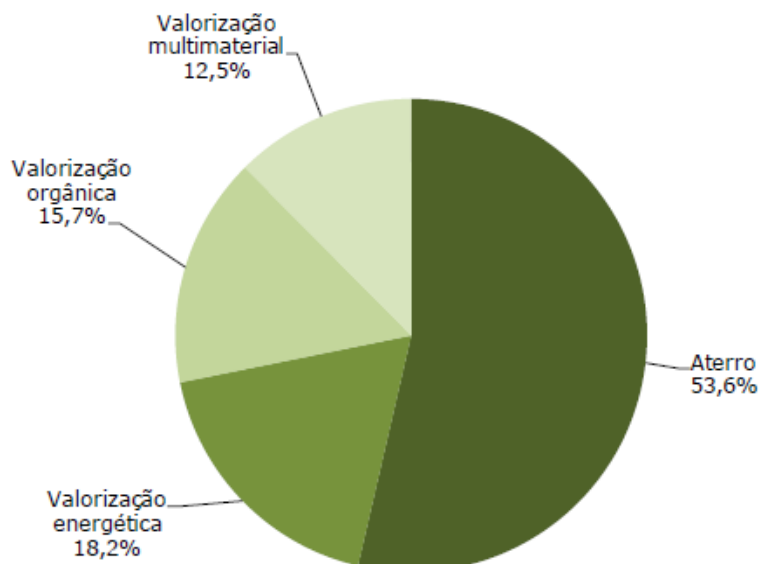
**Figura 7** – Caracterização física dos RU produzidos em Portugal, em 2012 (Fonte: Relatório Anual de Resíduos Urbanos (RARU) 2012 <sup>[10]</sup>).

Como se pode verificar, do total de RU produzidos cerca de 38,6 % correspondem a resíduos putrescíveis, 1,7 % a resíduos verdes recolhidos separadamente e 12,9 % correspondem a resíduos de papel e cartão. Posto isto, verifica-se que cerca de 53,2 % do total de RU produzidos correspondem a RUB. De notar ainda a elevada fração de resíduos recicláveis presente nos RU, que podem ser alvo de valorização.

#### 1.1.4. DESTINO DOS RESÍDUOS URBANOS

Uma gestão adequada dos resíduos deverá contribuir para a prevenção ou redução da sua produção, do seu carácter nocivo e dos impactes adversos no meio ambiente e na saúde pública, decorrentes da sua produção e gestão, bem como para a melhoria da eficiência da sua utilização e da proteção do ambiente e da saúde humana.

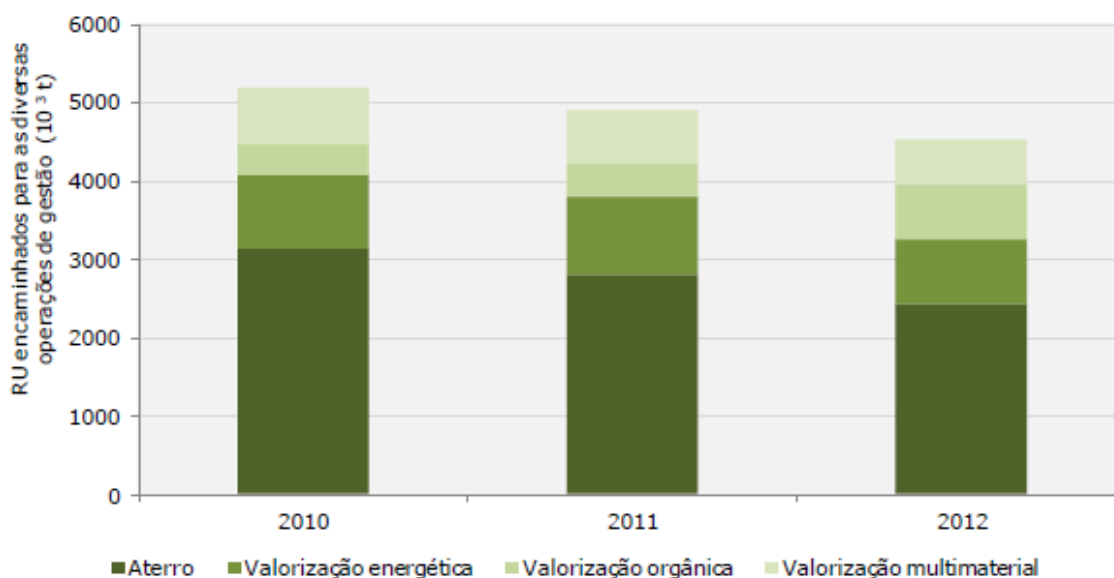
Como se pode observar na Figura 8, em 2012, os RU produzidos em Portugal Continental foram sujeitos às seguintes operações de gestão: 53,6 % foram encaminhados para aterro, 18,2 % foram alvo de valorização energética, 15,7 % foram valorizados organicamente e 12,5 % foram sujeitos a valorização multimaterial. Desta forma, a situação atual em termos de gestão de resíduos urbanos, embora tenha vindo a melhorar nos últimos anos, como adiante se mostrará, dista ainda bastante do que seria o ideal de acordo com a hierarquia de gestão de resíduos, uma vez que mais de metade dos RU continuam a ter como destino final a deposição em aterro.



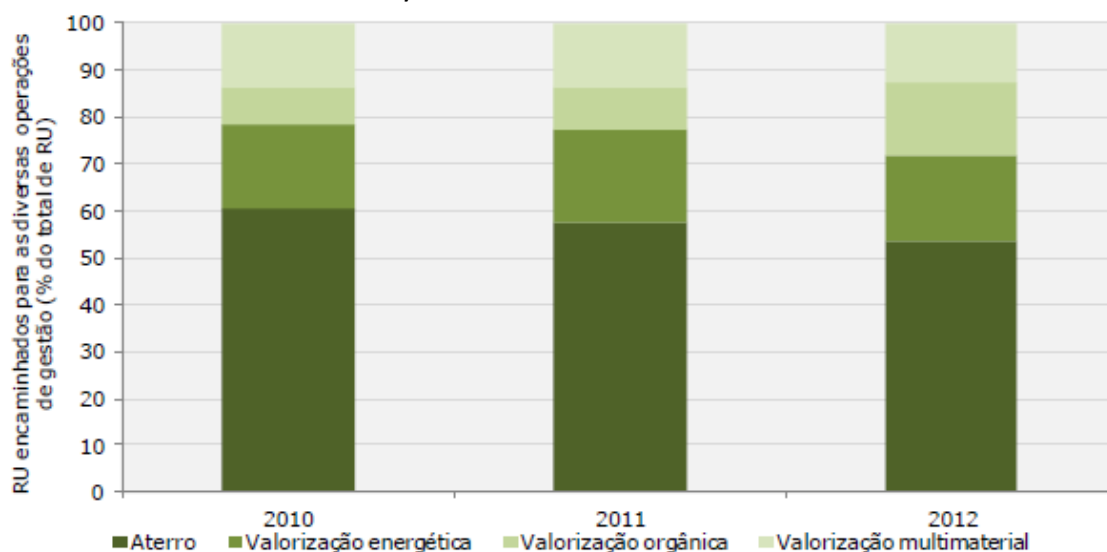
**Figura 8** – Destino direto dos RU produzidos em Portugal Continental, em 2012 (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup>).

Na Figura 9 encontram-se representados os quantitativos em valor absoluto e percentuais de RU encaminhados para as diferentes operações de gestão, desde o ano de 2010 até 2012. Efetuando uma análise dos gráficos da figura pode verificar-se que entre 2010 e 2012 se registou uma diminuição da quantidade total de RU produzidos, de cerca de 5,1 milhões de toneladas para cerca de 4,5 milhões de toneladas. No ano de 2010, cerca de 60 % dos RU produzidos foram encaminhados para aterro, cerca de 19 % foram valorizados energeticamente, apenas uma fração de cerca de 7 % foram valorizados organicamente e, por fim, cerca de 14 % foram alvo de valorização material. No ano seguinte, houve uma diminuição dos resíduos encaminhados para aterro, valorização energética e valorização multimaterial de 13,8 %, 15,9 % e 14,7 %, respetivamente. No entanto, houve um aumento da quantidade de resíduos encaminhados para valorização orgânica de 61,8 %. No ano de 2012 esta tendência voltou a verificar-se apresentando a distribuição representada na Figura 8 <sup>[13]</sup>.

Como se pode verificar, a quantidade de resíduos urbanos encaminhados para valorização orgânica verificou um aumento de 82,2 % entre os anos de 2010 e de 2012, o que se deve fundamentalmente à entrada em funcionamento, no referido período, de novas unidades de valorização orgânica <sup>[13]</sup>. No entanto, estes valores estão ainda muito longe daquilo que foi previsto alcançar no PERSU II (ver subcapítulo 1.1.1.).



a) Quantitativos em valor absoluto.



b) Quantitativos percentuais.

Figura 9 – Quantitativos de RU encaminhados para as diversas operações de gestão (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup>)

## 1.2. GESTÃO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS

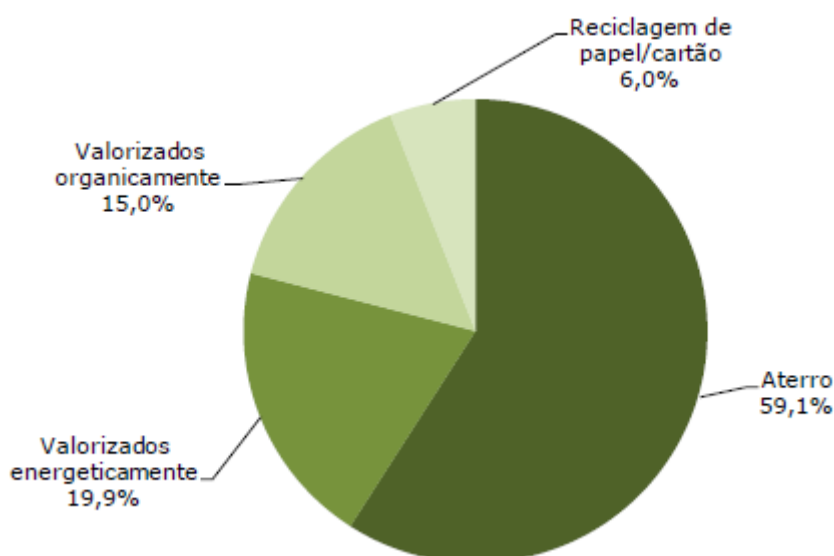
### BIODEGRADÁVEIS

O crescimento da população e o aumento da disponibilidade e variedade de produtos económicos em Portugal ao longo dos últimos anos levaram a um aumento significativo da quantidade de resíduos produzidos. Felizmente, desde a década de 90, muito tem vindo a ser feito no sentido de minimizar o impacto da produção crescente de resíduos na sociedade e na sua qualidade de vida, bem como no meio ambiente. No entanto, muito pode e deve ainda ser

feito neste domínio, nomeadamente no que se refere aos Resíduos Urbanos Biodegradáveis (RUB). São classificados como RUB todos os materiais orgânicos presentes nos RSU que são propícios à degradação natural, tal como os resíduos alimentares, de jardim, o papel e o cartão. Estes são constituídos por matéria orgânica, passível de ser degradada de forma aeróbia ou anaeróbia <sup>[15, 16]</sup>.

A gestão dos RUB tem como principal objetivo minimizar os impactes ambientais negativos ao nível da qualidade do ar, dos recursos hídricos, do solo e também da saúde humana, promovendo o aproveitamento de recursos, através da reciclagem do papel e do cartão e também da produção de composto e/ou energia <sup>[17]</sup>.

Como se pode observar na Figura 10, dos RUB, que em 2012 correspondiam a 53,2 % do total de RU produzidos, cerca de 59,1 % foram encaminhados para aterro, 19,9 % foram valorizados energeticamente, 15 % foram valorizados organicamente e os restantes 6 % foram para reciclagem (papel/cartão).



**Figura 10** – Destino final dos RUB, em 2012 (Fonte: REA 2013 <sup>[13]</sup>).

Assim, pode verificar-se que, em Portugal, os RUB são encaminhados fundamentalmente para deposição em aterro ou incineração. No entanto, este tipo de gestão acarreta diversos problemas. No que se refere à deposição de RUB em aterro, um dos problemas existentes, dada a sua elevada expressão nos RU, relaciona-se com a já elevada taxa de ocupação das infraestruturas que existem no país, o que na prática leva a que os aterros durem bastante menos anos do que o seu tempo de vida útil previsto. Por outro lado, este tipo de resíduos, quando confinado num aterro, entra em decomposição (aeróbia e anaeróbia, mas fundamentalmente anaeróbia), assim como contacta com águas de precipitação, dando origem a lixiviados e biogás, que podem ter efeitos negativos na sua exploração, por exemplo ao nível da saúde humana, ambiental e económico. Relativamente ao encaminhamento dos RUB para incineração, o principal problema é de facto a perda de um recurso com potencial para ser valorizado organicamente, bem como o facto de os RUB, devido ao seu elevado teor de humidade, não terem elevado potencial de valorização energética <sup>[15, 18]</sup>.

Desta forma, no contexto da gestão de resíduos em Portugal, e em virtude de imposições legais ao nível Europeu, têm vindo a ser alteradas as políticas no sentido de diminuir a quantidade de resíduos biodegradáveis que são encaminhados para aterro e/ou incineração. Este objetivo poderá ser alcançado recorrendo a tecnologias de valorização/reciclagem dos resíduos por via aeróbia e/ou anaeróbia.

A valorização/reciclagem orgânica aeróbia, conhecida como compostagem, é uma tecnologia na qual microrganismos aeróbios degradam biologicamente a matéria orgânica, transformando-os em compostos mais simples, que no seu conjunto compõem um composto passível de ser aplicado no solo como corretivo. A valorização anaeróbia de resíduos, designada por digestão anaeróbia, é um processo que promove a biodegradação da matéria orgânica em condições de anaerobiose tendo como resultado essencialmente dois produtos: o digerido e o biogás ( $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  fundamentalmente), podendo o último ser aproveitado energeticamente <sup>[15, 18]</sup>.

A seleção da tecnologia de gestão mais adequada a aplicar aos RUB deverá ter em conta diversos fatores, tais como, a composição física dos resíduos, as características demográficas do local em questão e os recursos financeiros existentes.

Apesar dos esforços que têm vindo a ser feitos no sentido de valorizar os RUB, existem ainda alguns constrangimentos que terão que ser ultrapassados para que se atinjam os objetivos já enumerados. São eles: subutilização da capacidade de valorização existente, atrasos na construção das novas unidades de valorização previstas e excessiva demora nos processos burocráticos associados à construção e funcionamento deste tipo de infraestruturas <sup>[17]</sup>.

## **1.3. COMPOSTAGEM**

### **1.3.1. PERSPETIVA HISTÓRICA**

Embora muitas vezes se possa pensar na compostagem como sendo uma tecnologia recentemente descoberta, a verdade é que este é um processo que remonta à Era da Mesopotâmia (2350 – 2150 a. C.). As civilizações antigas da América do Sul, China, Japão e Índia praticavam agricultura intensiva e utilizavam os resíduos orgânicos produzidos pelos animais e pelo Homem como fertilizantes. Também na Bíblia se encontram referências ao processo de compostagem. O agricultor cientista romano Marcus Cato também a ele se referiu. Estas práticas foram detalhadamente descritas há cerca de 1000 anos atrás, para o período dos 3000 anos precedentes, num manuscrito de El Doctor Excelente Abu Zacharia Iahia de Sevilha, o qual foi, posteriormente, traduzido do árabe para o espanhol por ordem do rei Carlos V e publicado em 1802 como El Libro de Agricultura. Pela sua própria experiência, Abu Zacharia insistia que os dejetos animais não deviam ser aplicados frescos e isolados ao solo, mas sim, após misturas com 5 a 10 vezes mais de resíduos vegetais e com materiais das camas dos animais, para aproveitar as urinas <sup>[19]</sup>.

Nos tempos medievais, surgem em Inglaterra, na Literatura Renascentista, referências ao uso do composto nos solos <sup>[20]</sup>.

Já no Séc. XX os métodos de compostagem e a velocidade do processo começaram a diferir um pouco da decomposição de materiais orgânicos que ocorre naturalmente. Surge então na Índia o conceito de Compostagem Industrial, que se deve a Sir Albert Howard e ao seu método *Indore*. Com este método começaram a ser aplicados princípios científicos à compostagem e aumentou-se a velocidade do processo através da seleção de materiais a compostar, da utilização de equipamentos mecânicos e da forma conferida às pilhas <sup>[20, 21]</sup>.

Contudo, com o desenvolvimento da agricultura a par destes progressos na compostagem, nomeadamente o aparecimento de máquinas agrícolas mecânicas, de fertilizantes químicos, de sistemas de rega automatizados e eficazes, entre outros, a compostagem caiu em desuso, tendo desaparecido quase por completo <sup>[21]</sup>. Nos finais do Séc. XX, com a problemática da gestão dos resíduos urbanos, nomeadamente a falta de espaço disponível nos aterros e também a crescente preocupação com o ambiente, a compostagem retomou a sua popularidade, está mais desenvolvida do que anteriormente, e é vista agora como uma forma de valorizar os resíduos orgânicos, transformando-os num composto com valor comercial <sup>[20, 21]</sup>.

### **1.3.2. CONCEITOS**

A compostagem não é um processo que possa ser definido de uma forma universal. A sua definição tem vindo a ser alterada ao longo dos anos, de acordo com a evolução do estudo e conhecimento do processo. Assim, são vários os autores que definem este termo, de forma mais ou menos semelhante.

De acordo com Kreith, F. & Tchobanoglous, G. <sup>[22]</sup>, a compostagem, aplicada aos resíduos urbanos, é um processo de decomposição biológica da sua fração orgânica biodegradável mediante condições controladas por forma a garantir a produção de um composto suficientemente estável para armazenamento e manuseamento, bem como para ser aplicado no solo.

Por sua vez, Haug, R. <sup>[23]</sup> define compostagem como sendo a decomposição e estabilização de substratos orgânicos sob condições favoráveis ao desenvolvimento de temperaturas termófilas (atingidas devido ao calor produzido pela atividade biológica), que resulta num produto final estável, sem microrganismos patogénicos nem sementes viáveis e que pode ser aplicado nos solos para seu benefício. Este mesmo autor refere ainda que é um processo que ocorre na presença de oxigénio, tendo como subprodutos o dióxido de carbono, água e calor. De forma semelhante, Cunha Queda <sup>[24]</sup> refere que a compostagem consiste na biooxidação controlada de substratos heterogéneos biodegradáveis por parte de microrganismos, como bactérias, actinomicetes e fungos, durante a qual ocorre uma fase termófila e a libertação de substâncias fitotóxicas, sendo produzido um composto que deverá ser homogéneo, suficientemente estável para ser armazenado e higienizado, e cuja aplicação no solo não seja prejudicial ao ambiente.

De uma forma mais simplista, Rynk, R. et al. <sup>[21]</sup> definem a compostagem como sendo uma processo biológico no qual os microrganismos intervenientes convertem os materiais

orgânicos como lamas, dejetos de animais, folhas, papel e restos de alimentos num composto. Acrescentam ainda que o processo é realizado na presença de oxigénio e sob condições controladas.

De uma perspetiva um pouco diferente, Shammas, N.K. & Wang, L. K. <sup>[25]</sup> descrevem a compostagem como sendo um dos vários métodos de tratar resíduos orgânicos por forma a obter um produto final com valor de mercado, fácil de manusear, armazenar e usar. Acrescentam ainda que este produto final apresenta níveis não detetáveis de patogénicos, podendo ser aplicado no solo como fertilizante.

De um modo geral, a compostagem é então um processo de biodegradação de matéria orgânica por ação de microrganismos. A velocidade de decomposição dessa matéria e a qualidade do produto final dependem de fatores como o tipo e o grau de mistura da matéria inicial, a presença de oxigénio, o teor de humidade, a temperatura e os nutrientes <sup>[21, 22]</sup>. O produto final deste processo é um composto homogéneo, que pode ser rico em nutrientes, sendo isento de patogénicos, e podendo ser aplicado no solo como fertilizante ou corretivo orgânico <sup>[20]</sup>.

### **1.3.3. OBJETIVOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS**

A aplicação da tecnologia da compostagem aos resíduos tem como principais objetivos <sup>[20]</sup>:

- a) Reduzir a quantidade de resíduos orgânicos encaminhados para aterro;
- b) Reduzir o volume dos resíduos orgânicos;
- c) Higienizar o material orgânico;
- d) Eliminar as substâncias fitotóxicas, os germes e as sementes;
- e) Eliminar maus odores;
- f) Reter a máxima quantidade de nutrientes no composto;
- g) Produzir um composto com qualidade para ser utilizado como fertilizante ou corretivo do solo;
- h) Aproveitamento de misturas de resíduos que, per si, não poderiam ser processados.

Assim, com o pressuposto de se atingirem estes objetivos, a compostagem é um processo que tem vindo a evoluir ao longo dos anos, apresentando, tal como noutros processos, vantagens comprovadas e desvantagens que ainda não foram ultrapassadas. Na Tabela 1 apresentam-se algumas das principais vantagens e desvantagens do processo de compostagem na atualidade.

**Tabela 1** – Vantagens e desvantagens da compostagem <sup>[21, 22, 25, 26]</sup>.

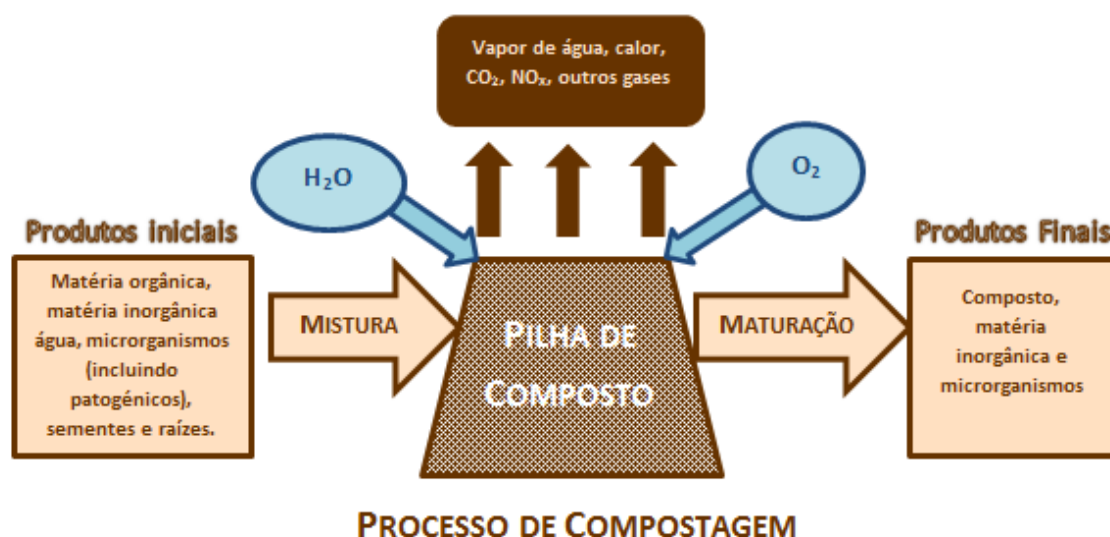
| <b>COMPOSTAGEM</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Vantagens</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Desvantagens</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Reduz a massa e o volume dos resíduos;</li> <li>✓ Reduz o odor;</li> <li>✓ Destrói patogênicos;</li> <li>✓ Elimina sementes de ervas daninhas;</li> <li>✓ Produz um composto com valor de mercado;</li> <li>✓ Aumenta a retenção de água do solo;</li> <li>✓ Diminui a quantidade de poluentes emitidos, na medida em que o azoto é incorporado no material, reduzindo a sua emissão para a atmosfera;</li> <li>✓ Contribui para a diminuição da deposição de resíduos em aterro bem como para o aumento de resíduos reciclados;</li> <li>✓ Produz um composto com utilidade nos solos;</li> <li>✓ Permite a reciclagem de um recurso valioso;</li> <li>✓ Reduz a dependência em fertilizantes minerais e a necessidade de utilizar pesticidas.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Custo dos equipamentos necessários;</li> <li>✓ Processo relativamente demorado o que limita a utilização para o tratamento de grandes quantidades de resíduos;</li> <li>✓ Necessidade de um mercado para venda do produto;</li> <li>✓ Duração do processo;</li> <li>✓ Perda de azoto sob a forma de amoníaco;</li> <li>✓ Emissões de odores e bioaerossóis durante o processo;</li> <li>✓ Processo normalmente influenciado pela temperatura ambiente;</li> <li>✓ Possibilidade de existirem patogênicos no produto final;</li> <li>✓ Emissão de matéria particulada e de alergênicos.</li> </ul> |

#### 1.3.4. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO

Sob condições processuais controladas, o processo de compostagem é realizado em duas etapas principais: fase ativa e fase de maturação <sup>[26]</sup>. A fase ativa caracteriza-se pela rápida e intensa biodegradação aeróbia da matéria orgânica e por temperaturas elevadas, uma vez que, como as reações de degradação são muito intensas, ocorre a libertação de grandes quantidade de energia na forma de calor, de CO<sub>2</sub> e de vapor de água. Já a fase de maturação é uma fase em que as reações se dão lentamente e na qual se dá uma diminuição progressiva da temperatura (até à temperatura ambiente). É nesta fase que a matéria orgânica em compostagem perde a sua fitotoxicidade residual, que a população microbiana se equilibra e que são sintetizadas substâncias húmicas <sup>[26 – 28]</sup>.

A preparação dos materiais para a compostagem implica que haja um pré-processamento dos mesmos. Nesta etapa é feita a separação da fração orgânica dos contaminantes, por forma a homogeneizar e melhorar a qualidade da matéria a compostar. Poderão ser utilizadas as seguintes operações: crivagem e triagem manual, trituração (redução da granulometria e homogeneização dos resíduos) e mistura (homogeneização e ajustamento da composição do material) <sup>[24, 29]</sup>. Tal como se pode observar na Figura 11, a compostagem propriamente dita tem início após a mistura dos materiais e sua disposição em pilha ou num reator, conforme o sistema escolhido.

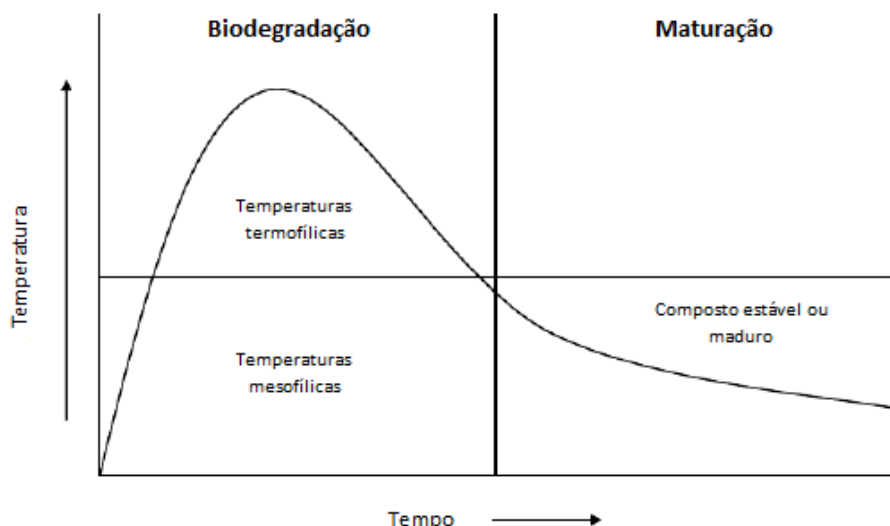




**Figura 11** – Fluxo material de um processo de compostagem convencional (Adaptado de *Manure Composting Manual* <sup>[26]</sup>)

Uma vez dispostos os materiais em pilha, inicia-se a fase ativa do processo de compostagem. Inicialmente ocorre um período de latência no qual os microrganismos fazem a sua adaptação inicial ao meio. Após este período, a atividade dos microrganismos mesófilos aumenta exponencialmente, levando a um aumento da temperatura da pilha devido à liberação de energia na forma de calor, como se pode observar na Figura 12. Desta forma, estabelecem-se condições que permitem o aparecimento de microrganismos termófilos. Com o aparecimento destes microrganismos, as temperaturas ascendem aos 40 °C, podendo até ocorrer temperaturas superiores a 70 °C, ao longo de cerca de 25 a 30 dias. Durante esta fase a matéria orgânica é decomposta muito rapidamente e os materiais são estabilizados e higienizados, consumindo assim mais oxigénio <sup>[30]</sup>. À medida que a disponibilidade de oxigénio começa a diminuir, a decomposição aeróbia abranda, podendo mesmo cessar se o fornecimento de oxigénio não for repostado. Uma vez que a liberação de calor está diretamente relacionada com a atividade dos microrganismos, a temperatura é um bom indicador do processo. Assim, a diminuição da quantidade de oxigénio disponível para o processo pode ser detetada através do abaixamento das temperaturas. Os níveis de oxigénio podem ser repostos fazendo o revolvimento do material ou através de arejamento forçado <sup>[21]</sup>. À medida que as fontes de energia para os microrganismos termófilos começam a escassear, a temperatura decresce gradualmente até se igualar à temperatura ambiente, como representado na Figura 12 <sup>[21, 30]</sup>.

Quando a temperatura da mistura de resíduos deixa de aumentar após um revolvimento, dá-se início ao período de maturação. A maturação é um período crítico e por vezes omitido do processo de compostagem. Durante a maturação os materiais continuam a ser compostados, mas muito lentamente. O consumo de oxigénio, a liberação de calor e a evaporação de água são muito menores. As temperaturas nesta fase aproximam-se ou igualam-se à temperatura ambiente, devido à diminuta atividade dos microrganismos.



**Figura 12** – Perfil típico de temperaturas ao longo do processo de compostagem (Adaptado de Epstein, E. <sup>[20]</sup>)

O período de maturação toma particular importância quando a fase ativa é curta ou mal efetuada. Um período de maturação longo evita a utilização de composto imaturo, que é prejudicial para as plantas uma vez que continua a consumir oxigénio e muitas vezes contém elevados níveis de ácidos orgânicos. O processo de compostagem não termina num momento em particular. O material vai sendo continuamente degradado até que todos os nutrientes sejam consumidos e os últimos microrganismos desapareçam. Quando a temperatura do material permanece à temperatura ambiente, pode-se considerar que o período de maturação está completo <sup>[21, 26]</sup>. Nesta fase mesófila, caracterizada pela maturação do composto, predominam processos metabólicos secundários favoráveis à transformação de compostos orgânicos mais resistentes como celulose e lenhina, e sua polimerização para a transformação em substâncias húmicas. O material torna-se estável, escuro, amorfo e com cheiro a terra <sup>[19]</sup>.

Quando o processo é desenvolvido nas condições ideais permite a redução de 20 a 60 % de volume, cerca de 40 % no teor de humidade e até 50 % de redução de massa <sup>[26]</sup>.

### 1.3.5. CONTROLO DO PROCESSO

A compostagem é um processo biológico complexo no qual intervêm diversos microrganismos que são os responsáveis pela degradação da matéria orgânica e sua transformação num produto estável – o composto. Assim, os principais fatores que influenciam o processo são aqueles que afetam, direta ou indiretamente, o metabolismo dos microrganismos intervenientes. A otimização desses fatores, denominados habitualmente de parâmetros operacionais, tem como principal objetivo proporcionar as condições ótimas para os microrganismos se desenvolverem, tornando assim o processo mais célere e eficaz.

#### 1.3.5.1. MICRORGANISMOS

Sendo a compostagem um processo essencialmente biológico, são muitos os microrganismos que nele participam e dão o seu contributo, de acordo com as diferentes gamas de temperatura, humidade, oxigénio e pH do material a compostar. Os microrganismos que povoam o material a compostar pertencem a 3 diferentes classes: bactérias, fungos e actinomicetes<sup>[22, 31]</sup>. De acordo com as suas necessidades em oxigénio, estes microrganismos podem ser agrupados em três grupos: anaeróbios (não toleram a presença de oxigénio), aeróbios (utilizam o oxigénio nos processos metabólicos) e anaeróbios facultativos (utilizam oxigénio quando este existe, mas também funcionam na sua ausência)<sup>[31]</sup>.

Os principais fatores que determinam o tipo de microrganismos presente em determinada altura são a temperatura e os nutrientes. De acordo com a temperatura, os microrganismos podem ser classificados em psicrófilos (0 – 25 °C), mesófilos (25 – 45 °C) ou termófilos (> 45 °C)<sup>[31, 32]</sup>.

É esta variedade de microrganismos, adaptável ao meio, que permite que o processo de compostagem ocorra apesar das constantes alterações nos parâmetros físicos e biológicos ao longo do processo.

As bactérias são os microrganismos mais abundantes no processo, sendo os que degradam inicialmente o material facilmente degradável como os compostos com baixo peso molecular e estruturas químicas simples, como os lípidos, os açúcares, os aminoácidos, os hidratos de carbono e as proteínas primárias. À medida que a disponibilidade de material facilmente degradável diminui começam então a surgir os fungos e os actinomicetes, que são microrganismos capazes de degradar os materiais mais complexos, ou seja, com elevado peso molecular e estruturas químicas complexas, como as proteínas, as gorduras, a celulose, a lenhina e a pectina transformando-os em compostos mais simples, degradáveis pelas bactérias<sup>[20, 31]</sup>. Na fase final do processo aparecem também vermes e larvas<sup>[22]</sup>.

Nesta fase de degradação a elevada temperatura, assumem um papel de destaque os fungos termófilos e ascomicetas do género *Xylaria* e basidiomicetes, que são particularmente ativos na decomposição da celulose e parcialmente da lenhina<sup>[19]</sup>.

Na fase de maturação predominam os fungos e actinomicetes, sendo estes últimos fundamentais para a humificação e para a produção de geosmina, que é uma substância aromática responsável pelo aroma a terra molhada, característico de um composto maturado.

No Anexo I é apresentada uma caracterização dos diversos microrganismos intervenientes no processo, bem como uma descrição das suas funções.

### **1.3.5.2. PARÂMETROS FÍSICOS**

#### **TEMPERATURA**

Tal como já foi referido, a temperatura é um excelente indicador do equilíbrio biológico do processo. Sendo a libertação de calor do material um indicativo de atividade microbológica (reações exotérmicas), facilmente se compreende que este parâmetro seja o que melhor define a eficiência do processo de compostagem, devendo por isso ser alvo de um rigoroso controlo<sup>[24, 26]</sup>.

A velocidade à qual os materiais se decompõem influencia a produção de calor e depende de parâmetros como a humidade, o arejamento, a razão C/N da mistura de materiais a compostar, a dimensão dos materiais, a dimensão do aglomerado de materiais e a temperatura ambiente local<sup>[33]</sup>. Segundo Epstein, E.<sup>[20]</sup>, a taxa de produção de calor é proporcional à matéria orgânica disponível para os microrganismos consumirem. Insam, H. & Bertoldi, M.<sup>[34]</sup> referem que a relação entre o aumento da temperatura e a eficiência do processo e sua velocidade poderá ser linear, durante a fase mesófila.

Segundo Rynk, R. et al.<sup>[21]</sup>, o processo de compostagem ocorre em dois intervalos de temperatura denominados de fase mesófila (10 — 41 °C) e fase termófila (> 41 °C). Segundo Kreith, F. & Tchobanoglous, G.<sup>[22]</sup> a fase mesófila abrange as temperaturas entre os 20 e os 45 °C e, por sua vez, a fase termófila compreende as temperaturas entre os 45 e os 75 °C. A transição de uma fase para a outra deve-se ao metabolismo dos microrganismos presentes e à sua adaptação ao meio. Rynk, R. et al.<sup>[21]</sup> refere que, embora as temperaturas verificadas na fase mesófila permitam que o processo de compostagem efetivamente ocorra, existem muitos especialistas no assunto que defendem que se devem manter temperaturas termófilas entre os 44 °C e os 66 °C uma vez que as mesmas garantem a destruição da maioria dos patogénicos, das sementes de ervas daninhas e também de determinadas larvas presentes no material a compostar. Alguns documentos indicam que a temperatura adequada para matar os patogénicos que afetam humanos é de 55 °C, e deve verificar-se durante um mínimo de 14 dias, refere Rynk, R. et al.<sup>[21]</sup>. Para temperaturas superiores a 55 °C, a velocidade e a eficácia do processo diminuem, pois a essas temperaturas os microrganismos começam a ser afetados, abrandando a sua atividade, podendo mesmo morrer ou entrar num estado de dormência. Quando esta situação se verifica, o processo de compostagem pára e apenas é retomado no caso da população de microrganismos retomar a sua atividade, o que se verifica quando é feito um revolvimento ou o arejamento do material<sup>[21, 22]</sup>.

Ao longo do processo de compostagem, o aumento da temperatura deve-se às reações exotérmicas associadas à atividade microbiana, que libertam grandes quantidades de calor. Por outro lado, a perda de água por evaporação, o movimento do ar, pilhas demasiado pequenas (no caso desta tecnologia) e temperaturas ambiente demasiado baixas são responsáveis pela perda de calor. A diminuição da quantidade de oxigénio disponível provoca a diminuição da atividade microbológica e, consequentemente, a diminuição da quantidade de calor libertada. Assim, habitualmente utilizam-se os revolvimentos e o arejamento por

forma a controlar o aquecimento/arrefecimento do conjunto de resíduos a compostar, introduzir novo oxigénio e, desta forma, dar continuidade à fase ativa do processo <sup>[21, 26]</sup>.

A definição de uma gama ótima de temperaturas que permita otimizar o processo de compostagem é um assunto discutível e controverso, uma vez que diferentes materiais se decompõem mais ou menos rápido a diferentes temperaturas <sup>[20]</sup>. Segundo Mustin, M. <sup>[35]</sup>, quando os materiais são constituídos por uma elevada quantidade de moléculas orgânicas facilmente degradáveis o processo resulta numa fase mesófila curta que se inicia apenas algumas horas após a formação da pilha, e na fase termófila atingem-se temperaturas muito elevadas durante algumas semanas. Se os materiais a compostar forem maioritariamente constituídos por moléculas orgânicas complexas, ambas as fases serão prolongadas e atingem-se temperaturas mais baixas. À medida que o processo de compostagem progride e os nutrientes disponíveis para os microrganismos são consumidos, as temperaturas começam a baixar atingindo num determinado momento a temperatura ambiente. Este declínio da temperatura é um indicador de que o processo está perto do fim <sup>[20]</sup>.

A distribuição da temperatura num conjunto de materiais em compostagem depende de fatores como: humidade, teor em oxigénio, tamanho do aglomerado de resíduos, condições atmosféricas e quantidade de nutrientes <sup>[25]</sup>. Na Figura 13 apresenta-se um perfil de distribuição da temperatura típico para uma pilha de compostagem. Como se pode observar, as temperaturas desenvolvem-se do interior (temperaturas mais elevadas) para o exterior (temperaturas mais baixas). Esta distribuição das temperaturas deve-se essencialmente ao facto de, no interior do conjunto de materiais, as perdas do calor produzido pelos microrganismos serem muito menores do que à superfície. No entanto, na prática, surgem zonas com distribuições de temperatura distintas, face à heterogeneidade dos resíduos. Por vezes, surgem também pontos frios na mistura, que podem indiciar locais de decomposição anaeróbia e que têm potencial para produzir odores e compostos fitotóxicos <sup>[36]</sup>.



**Figura 13** – Perfil de distribuição de temperaturas típico de uma pilha de compostagem <sup>[37]</sup>.

### **HUMIDADE**

A humidade é necessária no processo da compostagem pois serve de suporte aos processos metabólicos realizados pelos microrganismos. A água presente nos materiais a compostar é o meio no qual ocorrem as reações químicas, o transporte dos nutrientes e a movimentação dos microrganismos <sup>[21]</sup>.

Shammas, N.K. & Wang, L. K. <sup>[25]</sup>, referem que a humidade mínima necessária para haver atividade biológica se encontra no intervalo de 12 a 15 %. No entanto, referem também que um valor de humidade abaixo dos 40 % limita a taxa de decomposição. Para estes autores, a humidade ótima situa-se entre os 50 a 60 %. Caso a humidade ultrapasse os 60 % é posta em causa a integridade estrutural da pilha. Nos casos em que a humidade do material inicial a compostar é demasiado elevada é comum recorrer-se à mistura de um agente estruturante seco ou de um produto reciclado <sup>[25]</sup>. Por sua vez Rink, R. et al. <sup>[21]</sup> refere que para percentagens de humidade inferiores a 15 % a atividade microbiológica cessa, sendo a gama ótima entre os 40 a 65 %. Para valores superiores a 65 % de humidade a água enche os poros existentes no material limitando a movimentação do ar, o que habitualmente favorece a produção de maus odores devido ao surgimento de condições de anaerobiose. Epstein, E. <sup>[20]</sup> refere que para teores de humidade inferiores a 20 % a atividade microbiana já cessa e que para teores superiores a 60 % já se verifica a ocupação dos poros do material com água, a limitação da circulação de oxigénio e a diminuição da atividade microbiana. O mesmo autor refere que o teor ótimo em humidade é de aproximadamente 50 %.

Durante o processo de compostagem, o teor em humidade pode variar. Aumenta face à introdução de água no sistema (precipitação ou rega) assim como pela produção de água pelos microrganismos aeróbios durante a atividade metabólica, e pode ser diminuído devido a perdas por evaporação. A perda ou ganho de humidade ao longo do processo de compostagem é então função do tipo de tecnologia utilizado, da temperatura e das condições ambientais em que se desenvolve o processo <sup>[20]</sup>. Piedade, M. e Aguiar, P. <sup>[38]</sup> referem que a dimensão das partículas também influencia os valores de humidade ditos ótimos, sendo que quanto maior for a dimensão das partículas, maior será o teor de humidade aceitável. Vallini, G. <sup>[28]</sup> acrescenta que a porosidade e o tipo de matéria-prima utilizada são também fatores determinantes para a definição do intervalo de teores de humidade ótimos.

Após a fase de maturação, findo o processo de compostagem, o teor em água do composto deverá ser bastante baixo, na ordem dos 30 % por forma a evitar qualquer atividade biológica adicional no material estabilizado <sup>[39]</sup>.

### **ODORES**

O odor é uma propriedade de uma substância ou mistura de substâncias que, consoante a sua concentração, desperta o sentido do olfato causando uma sensação de odor <sup>[40]</sup>. No processo de compostagem, o odor é considerado um parâmetro operacional, que deve ser tido em conta aquando do planeamento de uma instalação de compostagem, uma vez que o mesmo é inerente ao processo, sendo muito difícil ou até mesmo impossível projetar e construir um

processo de compostagem sem emissão de substâncias odoríferas <sup>[22, 40]</sup>. Assim, é fundamental conhecer em que circunstâncias se formam e são libertados os compostos responsáveis pelos odores, que tipo de compostos se pode libertar durante um processo de compostagem e que condições são favoráveis aos mesmos <sup>[31]</sup>.

Epstein, E. <sup>[20]</sup> refere que a emissão de odores tem sido o principal motivo de oposição por parte das populações à construção de instalações para o processo de compostagem, sendo que em alguns casos as reclamações foram tantas que acabaram por fechar as instalações ou as mesmas lutam agora em processos legais para permanecerem em funcionamento.

Teoricamente, no processo de compostagem, decorrendo este em condições de aerobiose, não são produzidos compostos odoríferos, tal como acontece nos processos anaeróbios <sup>[21]</sup>. No entanto, na realidade podem-se libertar alguns odores devido à tipologia de resíduos utilizados e ao desenvolvimento do processo, caso o mesmo não se desenvolva em condições ótimas <sup>[22]</sup>. Desta forma, distinguem-se três principais fontes de odores: (1) a matéria-prima utilizada, (2) emissão de compostos voláteis que resultam da decomposição química e microbiológica da matéria orgânica na presença de oxigénio e (3) produtos metabólicos resultantes de degradação anaeróbia não controlável <sup>[20, 21]</sup>. Os principais compostos que libertam odores são os compostos de enxofre e de azoto e os compostos orgânicos voláteis (COV) <sup>[31]</sup>.

É importante referir que, no entanto, a produção de um composto odorífero não significa necessariamente que o mesmo se irá libertar. Por vezes, estes compostos movem-se dentro da mistura de resíduos sendo posteriormente degradados <sup>[31]</sup>.

A composição química inicial da mistura a compostar, a concentração de oxigénio, a taxa de difusão de oxigénio, o tamanho das partículas, o teor de humidade e a temperatura influenciam a quantidade e o tipo de odores que se formam e determinam se os mesmos serão ou não libertados <sup>[31]</sup>. O tipo de tecnologia implementado e o tipo de instalações também afetam o tipo de odores que são produzidos, a quantidade que é libertada e como é que os mesmos se libertam. Se a tecnologia utilizada conseguir garantir as condições operacionais adequadas, nomeadamente no que se refere ao fornecimento de oxigénio, os compostos odoríferos formados serão menos ofensivos do que aqueles que se formariam em condições de anaerobiose. O tipo de instalações afeta essencialmente a quantidade e a intensidade dos compostos odoríferos que se libertam, uma vez que, por exemplo, se o processo decorrer dentro de instalações fechadas o ar pode ser tratado antes de ser expulso dessas instalações, diminuindo assim a quantidade e a intensidade dos odores libertados <sup>[20]</sup>.

As etapas da compostagem nas quais o odor é mais intenso são o armazenamento e manuseio da matéria-prima e as fases ativa e de maturação <sup>[20]</sup>.

Relativamente aos fatores anteriormente enumerados, existem algumas medidas de otimização dos mesmos que permitem a diminuição e/ou remoção/eliminação. Por exemplo: a minimização do aparecimento de condições anaeróbias é possível controlando a mistura inicial de resíduos, evitando misturas excessivamente húmidas, monitorizando as temperaturas e promovendo o revolvimento e/ou arejamento dos materiais; relativamente à libertação de amoníaco a mesma pode se controlada adicionando um excesso de carbono na mistura de

materiais e mantendo o pH tão próximo quanto possível da neutralidade e nunca superior a 8,5<sup>[21, 31]</sup>.

Nos casos em que, otimizando os fatores anteriormente enumerados não se consegue uma remoção e/ou eliminação dos odores, é necessário recorrer a tecnologias que consigam esse objetivo. Os biofiltros são um método de remoção de odores do processo de compostagem cuja eficácia se encontra já devidamente comprovada. Uma vez que a maioria dos compostos odoríferos libertados durante o processo de compostagem são compostos intermediários do processo metabólico que podem ser metabolizados a compostos inócuos, os biofiltros contêm microrganismos que efetuam essa tarefa. Os odores provenientes de produtos gasosos como o amoníaco e os COV podem ser controlados recorrendo-se a filtros de solo, pois o solo é um excelente meio de remoção de odores, através da absorção química, oxidação, filtração e degradação biológica aeróbia dos gases orgânicos. Na maioria das vezes estes filtros não são muito eficazes na remoção do amoníaco, pelo que é necessário utilizarem-se lavadores de gases (*scrubbers*) para o efeito<sup>[31]</sup>.

No caso de as instalações de compostagem serem providas de cobertura, existem duas opções de controlo dos odores: o sistema de ventilação remove e direciona o ar interior para um sistema de tratamento de odores ou o sistema de ventilação tem a capacidade de diluir o ar interior das instalações fazendo com que um grande caudal de ar exterior se movimente para dentro do edifício<sup>[21]</sup>.

#### ***POROSIDADE, ESTRUTURA, TEXTURA E TAMANHO DAS PARTÍCULAS***

A porosidade, a estrutura e a textura da mistura de resíduos a compostar são parâmetros que dependem das características físicas dos materiais que a constituem, como o tamanho das partículas, a forma e a consistência. Estes parâmetros afetam o processo de compostagem devido à sua influência no arejamento<sup>[21, 24]</sup>.

Os parâmetros referidos anteriormente podem ser ajustados através de uma seleção criteriosa da matéria-prima para o processo e de uma eficiente mistura da mesma. Em determinados casos pode e deve ser equacionada a adição de um agente estruturante para melhorar a estrutura da mistura de materiais e a sua porosidade. Os agentes estruturantes podem ser degradados juntamente com a matéria-prima ou podem ser removidos no final do processo e reutilizados<sup>[20, 21]</sup>.

A porosidade refere-se aos poros entre as partículas constituintes da massa em compostagem, que se encontram parcialmente preenchidos com o ar que fornece oxigénio aos microrganismos e permitem a circulação desse mesmo ar. Quando o material fica saturado com água, o espaço disponível para a circulação do ar diminui, abrandando o processo de compostagem<sup>[21, 26]</sup>. A porosidade pode ser aumentada através de revolvimento<sup>[41]</sup>. A característica que se refere à capacidade de resistir à sedimentação e à compactação é a estrutura. Uma boa estrutura previne a perda de porosidade nas zonas mais húmidas da pilha<sup>[21]</sup>. Por sua vez, a textura é a característica que descreve a área superficial disponível para a atividade aeróbia dos microrganismos<sup>[21]</sup>.



No que se refere ao tamanho das partículas são vários os autores que referem que quanto menor for o tamanho das partículas maior é a taxa de decomposição aeróbia uma vez que há uma maior área superficial disponível para os microrganismos degradarem <sup>[21, 22, 41]</sup>. No entanto, Rink, R. et al. <sup>[21]</sup> e Kreith, F. & Tchobanoglous, G. <sup>[22]</sup> referem que partículas demasiado pequenas reduzem a porosidade da massa de materiais a compostar, pelo que é necessário o estabelecimento de um tamanho que não comprometa nem a taxa de degradação nem a porosidade, que na sua opinião se encontra entre 3 a 50 mm.

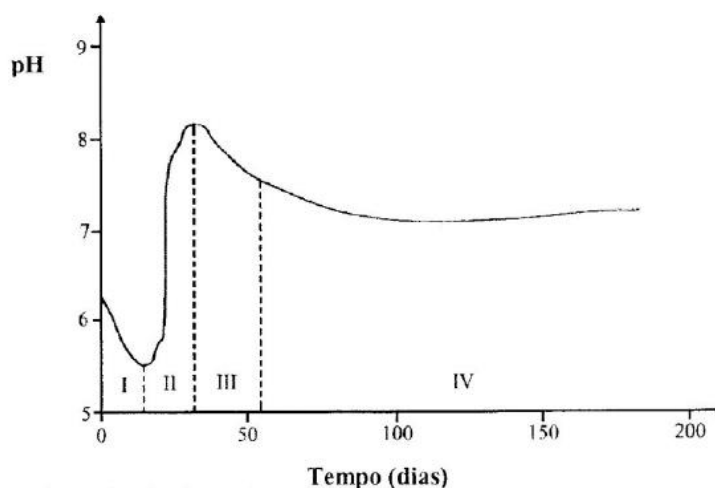
### **1.3.5.3. PARÂMETROS QUÍMICOS**

#### ***pH***

O pH não é visto como sendo efetivamente um parâmetro operacional de controlo <sup>[22]</sup>. É, por vezes, referido que o processo de compostagem é insensível ao pH das matérias-primas a utilizar, comparativamente com outras misturas de materiais orgânicos, na medida em que a variedade de microrganismos é tão alargada, que se reflete num amplo intervalo de valores ótimos de pH <sup>[21]</sup>. De facto, a dificuldade que existe em alterar o pH do material a compostar para um valor que promova o máximo crescimento biológico é grande, devido essencialmente à heterogeneidade de microrganismos envolvidos no processo. Segundo Shammass, N.K. & Wang, L. K. <sup>[25]</sup> este parâmetro é essencialmente “auto-regulado”.

Rynk, R. et al. <sup>[21]</sup> referem que a gama preferencial de pH se situa entre 6,5 e 8,0, mas que o processo também pode ocorrer na gama entre 5,5 e 9. Contudo, estes autores referem que o processo será menos eficaz nesta última gama do que a pH neutro, uma vez que os valores próximos da neutralidade são aqueles aos quais os microrganismos melhor se adaptam. Por sua vez, Kreith, F. & Tchobanoglous, G. <sup>[22]</sup> e Shammass, N.K. & Wang, L. K. <sup>[25]</sup> concordam que para o crescimento da maioria das bactérias o pH ótimo situa-se entre 6 e 7,5 e para os fungos situa-se entre 5,5 e 8,0. Russo, M. <sup>[37]</sup> afirma que se pode compostar matéria orgânica com pH entre 3 e 11, apesar de os valores na gama da neutralidade serem considerados os mais adequados.

Kreith, F. & Tchobanoglous, G. <sup>[22]</sup> referem que na prática pouco ou nada é necessário fazer para que o pH se mantenha na gama “ótima” para os microrganismos. Na Figura 14 apresenta-se um gráfico representativo da variação de pH ao longo do processo de compostagem. Como se pode observar, no início do processo de compostagem, os valores de pH decrescem para valores próximos de 5 devido à atividade de determinadas bactérias que metabolizam os complexos materiais carbonáceos (como os polissacarídeos e a celulose) produzindo ácidos orgânicos. Esta produção de ácidos orgânicos é acompanhada do desenvolvimento da população microbiana (por exemplo, fungos) para a qual os ácidos servem como substrato. Consequentemente, dá-se um aumento gradual do valor do pH para valores entre 8 e 9. No final da maturação o pH desce até 7 ou 8 devido às propriedades de tamponamento características das substâncias húmicas então formadas <sup>[22, 37]</sup>.



**Figura 14** – Curva representativa da variação do pH ao longo do processo de compostagem <sup>[35]</sup>.

Por vezes, quando o pH inicial é extremamente baixo há uma certa tendência à adição de óxido de cálcio para subir o seu valor, sendo no entanto desaconselhada devido à sua contribuição para a perda de azoto através da volatilização do amoníaco. Esta perda pode ser particularmente problemática se ocorrer na fase ativa do processo de compostagem <sup>[21, 22, 25]</sup>.

### **RAZÃO C:N**

Para que a população microbiana cresça existem macro e micronutrientes que devem estar disponíveis em grandes quantidades, tais como o carbono, o azoto, o fósforo e o potássio. Destes, os mais importantes, e que, por isso, merecem particular atenção, são o carbono e o azoto. O balanço entre estes dois nutrientes no material a compostar é fundamental para os processos químicos que ocorrem na compostagem <sup>[31]</sup>. Krider, J. N. & Chapman, D. <sup>[31]</sup> referem que a importância destes dois nutrientes em particular prende-se com o facto de, se estes nutrientes estiverem na proporção correta no material a compostar, os restantes nutrientes tendem a estar presentes em quantidades suficientes.

O carbono é extremamente importante para promover o crescimento microbiano, sendo utilizado como fonte de energia. Sob condições de aerobiose, uma parte do carbono liberta-se na forma de dióxido de carbono e o restante combina-se com o azoto no processo de desenvolvimento dos microrganismos. É na fase termófila que se verifica a libertação de maiores quantidades de dióxido de carbono. Assim, ao longo do processo de compostagem verifica-se um decréscimo da quantidade de carbono no conjunto de materiais, sendo que o composto terá cerca de 30 a 50 % menos de carbono do que o material inicial <sup>[20, 31]</sup>.

Por sua vez, o azoto (N) é fundamental para a síntese de células, aminoácidos e proteínas e está constantemente a ser reciclado, pois todo o azoto incorporado nas células dos microrganismos fica novamente disponível quando estes morrem. O facto de o carbono ser emitido para a atmosfera sob a forma de dióxido de carbono enquanto o azoto é

constantemente reciclado, faz com que a razão C:N decresça ao longo do processo de compostagem<sup>[31]</sup>.

Shammas, N.K. & Wang, L. K.<sup>[25]</sup>, Rynk, R. et al.<sup>[21]</sup>, Epstein, E.<sup>[20]</sup>, Kreith, F. & Tchobanoglous, G.<sup>[22]</sup> e Krider, J. N. & Chapman, D.<sup>[31]</sup> referem que os microrganismos utilizam entre 20 a 40 partes de carbono (em massa) por cada parte de azoto. Para estes autores razões entre 25 e 35 são as que promovem as melhores condições, sendo a razão de 30:1 a razão ótima para que o processo de compostagem seja eficiente.

De um modo geral, todos os autores anteriormente referidos afirmam que se o rácio C:N for demasiado elevado (superior a 40:1) o processo de compostagem abranda, podendo mesmo cessar. Neste caso, o fator limitante do processo é a disponibilidade de azoto. Verifica-se que os microrganismos demoram mais tempo para consumir o carbono, sendo necessários vários ciclos de vida dos microrganismos para reduzir a razão C:N para um nível adequado. Razões C:N demasiado baixas (inferiores a 20:1) conduzem à perda excessiva de azoto sob a forma de amoníaco, que habitualmente se acumula nos materiais em quantidades consideradas tóxicas ou liberta-se podendo contaminar o ambiente e afetar a saúde humana. Nesta situação o fator limitante é a disponibilidade de carbono<sup>[21, 22, 31]</sup>.

#### **AREJAMENTO E DISPONIBILIDADE DE OXIGÉNIO**

Sendo a compostagem um processo desenvolvido em condições aeróbias, a disponibilidade de oxigénio é um fator fundamental para a sobrevivência dos microrganismos aeróbios.

Os microrganismos aeróbios necessitam do oxigénio para oxidar compostos orgânicos e dessa forma garantir a energia necessária ao seu desenvolvimento. O oxigénio que estes utilizam é aquele que se encontra presente na mistura gasosa que preenche os espaços existentes entre as partículas do substrato. Os microrganismos assimilam o oxigénio dissolvido na água, através da sua difusão entre os espaços intersticiais e o filme da solução aquosa que envolve as partículas orgânicas. De forma semelhante, o dióxido de carbono e o vapor de água que resultam das trocas gasosas que se realizam nas células microbianas, atravessam o filme da solução aquosa anteriormente referida e seguem para os espaços intersticiais. Desta forma, os espaços existentes entre as partículas dos substratos, os macroporos, estão constantemente preenchidos pelos gases constituintes do ar<sup>[42]</sup>. Este mecanismo de respiração dos microrganismos aeróbios faz com que a quantidade de ar fornecida aos materiais em compostagem não reflita exatamente a quantidade de oxigénio que chega até aos microrganismos<sup>[31]</sup>.

A quantidade de oxigénio que deve ser fornecida durante o processo de compostagem é influenciada pela natureza do material a compostar e pela sua biodegradabilidade, fase do processo, tamanho das partículas do material, teor em humidade, temperatura e quantidade e tipo de microrganismos aeróbios presentes no processo<sup>[42, 43]</sup>.

Krider, J. N. & Chapman, D.<sup>[31]</sup>, Shammas, N.K. & Wang, L. K.<sup>[25]</sup>, Epstein, E.<sup>[20]</sup> assim como no documento *Manure Composting Manual*<sup>[26]</sup> refere-se que é necessária uma concentração

mínima de oxigénio de 5 % e máxima de 15 % (em volume) para que se mantenham condições aeróbias na massa de resíduos em compostagem. Caso não seja fornecido oxigénio suficiente aos microrganismos aeróbios, os mesmos darão lugar a microrganismos anaeróbios que se tornarão dominantes, abrandando o processo de compostagem e originando a acumulação de compostos como os ácidos orgânicos voláteis, os sulfuretos, etc., que se caracterizam por terem uma elevada fitotoxicidade e um odor intenso e agressivo. Concentrações de oxigénio superiores a 15 % resultam num decréscimo da temperatura devido ao aumento do fluxo de ar no interior da mistura de resíduos a compostar.

Para assegurar as condições de aerobiose de que os microrganismos necessitam, torna-se necessário proceder ao arejamento, que, por sua vez, é uma função do tipo de sistema implementado, como mais adiante se descreverá (subcapítulo 1.3.6.) <sup>[20]</sup>. Adicionalmente, e dependendo da tecnologia a implementar, o oxigénio é fornecido ao material através de convecção natural <sup>[26]</sup>.

Para além de fornecer o oxigénio necessário ao processo, o arejamento também é importante para a remoção do calor em excesso, remoção do vapor de água (permitindo a secagem do material) e remoção dos gases resultantes da decomposição do substrato. A quantidade de oxigénio necessária para remover o excesso de calor é cerca de 10 vezes superior àquela que os microrganismos necessitam para a metabolização dos compostos. Assim, por vezes é a temperatura que determina a frequência com que se deve fazer o arejamento do material <sup>[21, 33, 44]</sup>.

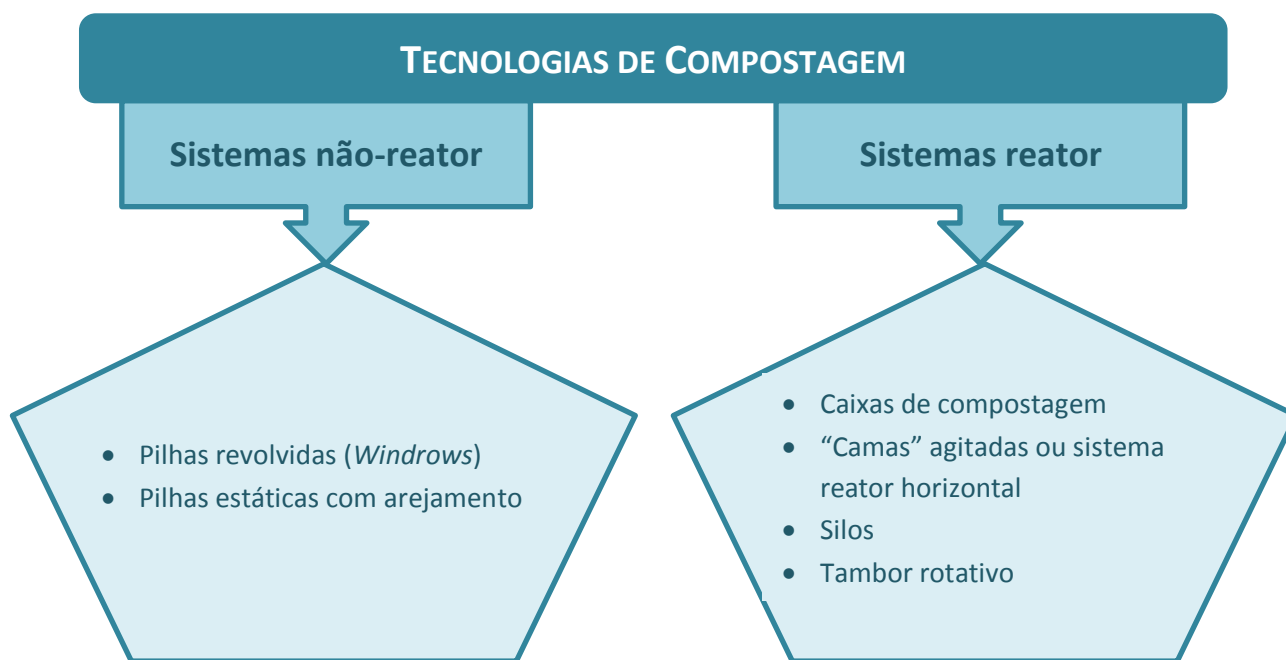
Ao colmatar as necessidades dos microrganismos em oxigénio garante-se a existência de uma população de microrganismos aeróbios variada, um processo menos moroso relativamente à decomposição e à estabilização da matéria orgânica e um controlo mais eficaz dos odores uma vez que se evitam as condições anaeróbias no processo.

### **1.3.6. TECNOLOGIAS DE COMPOSTAGEM**

Atualmente existem várias tecnologias aplicáveis ao processo da compostagem. A escolha da tecnologia que melhor se aplica a cada caso depende do tipo e quantidade de materiais a compostar, do espaço disponível para as instalações, da disponibilidade de recursos humanos, financeiros, etc., das características que se pretenda que o composto final apresente, entre outras <sup>[20, 31, 41]</sup>.

São várias as designações propostas por diferentes autores para classificarem as tecnologias de compostagem. Sendo a disponibilidade de oxigénio o principal fator que é influenciado pelo tipo de tecnologia implementada no processo de compostagem, são muitos os autores que classificam os sistemas em abertos e fechados. Pelo facto de, intuitivamente, facilmente se associar os sistemas abertos a sistemas implementados ao ar livre e sistemas fechados a sistemas encerrados dentro de um local coberto, o que não corresponde à realidade, autores como Haug, R. <sup>[23]</sup> preferem utilizar a classificação em sistemas não-reator e sistemas reator.

Na Figura 15 apresenta-se um esquema resumo dos sistemas de compostagem mais comuns, utilizando este último critério.



**Figura 15** – Esquema resumo das tecnologias de compostagem mais comuns.

Claro que em quaisquer dos casos estamos perante um reator biológico, no entanto, a distinção usa-se para separar o que está contentorizado ou confinado em estruturas físicas fechadas dos sistemas essencialmente ao ar livre.

Nos sistemas não-reator, o processo decorre em pátios abertos ao ar livre, em pilhas revolvidas ou estáticas e com arejamento forçado ou ventilação natural. Os sistemas reator são sistemas com mais *input* tecnológico nos quais o processo de compostagem decorre em compartimentos fechados. A introdução de ar é feita com recurso ao arejamento forçado ou revolvimento mecânico, por forma a acelerar o processo de decomposição.

No Anexo II apresenta-se uma descrição detalhada das tecnologias de compostagem aqui referidas.

### 1.3.7. O COMPOSTO

O composto ou compostado pode ser definido como sendo o produto final, higienizado e rico em compostos húmicos, resultante do processo de compostagem, que pode ser manuseado e armazenado sem qualquer problema, tendo um efeito benéfico quando aplicado nas plantas <sup>[23]</sup>.

A qualidade de um composto é determinada pelas suas características físicas, químicas e biológicas (ver Anexo III). Uma vez que algumas destas características são subjetivas, não

existe um método único para determinar a qualidade do composto. A qualidade que se pretende que o composto tenha também depende do tipo de utilização à qual se destina <sup>[31]</sup>. Segundo Epstein, E. <sup>[20]</sup>, a qualidade de um composto é função do tipo de matéria-prima utilizada e da forma como o composto é preparado.

Durante o processo de compostagem, o volume da pilha reduz-se para cerca de metade do volume inicial, o que representa também uma grande influência na qualidade e quantidade de composto produzido, uma vez que se traduz num aumento da concentração de nutrientes e na redução do espaço necessário para o seu armazenamento e transporte <sup>[33]</sup>.

De acordo com Brito, L.M. <sup>[33]</sup> e Sousa, D. <sup>[45]</sup>, tendo por base indicadores de qualidade, nomeadamente teor em metais pesados, em materiais inertes antropogénicos (vidro, metais e plástico e microrganismos patogénicos (*E.Coli* e *Salmonella* spp.)), o composto produzido em unidades de compostagem pode ser classificado em três tipos:

- ✓ **Composto corrente** – composto com qualidade mínima obrigatória, que cumpra os valores limite especificados nas Leis Portuguesas ou em Diretivas Comunitárias para utilização na agricultura, na floresta ou na recuperação de áreas degradadas;
- ✓ **Composto ecológico** – composto que, pela sua qualidade, satisfaz os requisitos necessários à atribuição de rótulo ecológico comunitário;
- ✓ **Composto biológico** – composto aprovado pelos organismos de controlo para ser utilizado no modo de produção biológica em Portugal.

A fertilização consiste em promover o enriquecimento dos solos por forma a melhorar o desenvolvimento das plantas. Os fertilizantes podem ser corretivos, que corrigem as propriedades do solo de acordo com um dado uso, ou adubos que, pela elevada concentração de nutrientes que contêm, fertilizam o solo diretamente. O composto produzido na compostagem, devido às características químicas que apresenta é classificado e utilizado habitualmente como um corretivo orgânico, na medida em que são utilizados essencialmente para aumentar o teor de matéria orgânica do solo <sup>[46]</sup>.

A aplicação de composto nos solos melhora substancialmente as suas propriedades físicas, químicas e biológicas, pelo que são várias as atividades onde pode ser utilizado. Destas destacam-se: agricultura, paisagismo, jardinagem, viveiros, cobertura, recuperação e reabilitação de áreas degradadas, aterros e controlo de erosão <sup>[47]</sup>.

Da aplicação de composto ao solo decorrem, fundamentalmente, as seguintes vantagens <sup>[48]</sup>:

- ✓ Incremento do arejamento, da capacidade de retenção de água e da infiltração;
- ✓ Incremento do teor de nutrientes e matéria orgânica;
- ✓ Redução da densidade aparente dos solos;
- ✓ Redução da lixiviação dos solos;
- ✓ Dada a sua composição à base de colóides húmicos melhoram a estrutura e agregação dos solos;
- ✓ Devido à sua constituição química, podem reter fisicamente iões minerais e cedê-los gradualmente às culturas por permuta iónica com as raízes;
- ✓ Estimula o sistema radicular das plantas como consequência da melhoria das características físicas dos solos;

- ✓ Serve de suporte às raízes das plantas;
- ✓ Aumenta a absorção de calor pelo solo devido à sua cor;
- ✓ Diminui a erosão do solo.

Em termos legais, a nível europeu, foi em 2001 apresentado um documento de trabalho, intitulado de *“Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft”* <sup>[49]</sup> que se debruça sobre este tema. Em particular, propõe classes para a qualidade do composto, estabelece limites de concentração de metais pesados e microrganismos patogénicos e indica quais os resíduos que são adequados para o tratamento biológico. A nível nacional, até ao momento não existe regulamentação específica para o composto, no entanto, em 2001 foi apresentada pelo Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva/Instituto Nacional de Investigação Agrária e das Pescas (LQARS/INIAP) uma *“Proposta de regulamentação sobre qualidade de composto para utilização na agricultura”* <sup>[50]</sup>, na qual se apresentam os limites de metais pesados para composto e a sua classificação de acordo. Já em 2004, foi elaborada uma *“Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto”* com base na proposta de 2001 e no documento europeu *“Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft”* <sup>[49]</sup>. Em 2008, foi elaborado um documento intitulado de *“Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto”* <sup>[51]</sup>, no qual se estabelecem as especificações para o composto, definem-se classes de qualidade, fixam-se os critérios para a sua utilização, indicam-se as restrições ao seu uso e definem-se os resíduos que podem ser utilizados para a produção de composto <sup>[52]</sup>. Este último documento foi elaborado tendo em conta o 2º Draft do Documento de trabalho sobre o Tratamento Biológico de Resíduos Biodegradáveis, DG-ENV. A.2, de fevereiro de 2001 e o Documento de Trabalho sobre Lamas e Resíduos Biológicos, DG-ENV. A.2/LM, de dezembro de 2003 <sup>[51]</sup>.

No Anexo II do documento *“Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft”* <sup>[49]</sup>, referem-se os requisitos sanitários bem como algumas condições operacionais que devem ser verificadas para que se atinja um elevado nível de atividade biológica. Ao longo do processo de compostagem, os resíduos devem ser devidamente misturados e expostos a uma temperatura adequada, tal como se expõe na Tabela 2. Consoante o sistema de compostagem é também definido neste documento o tempo durante o qual as temperaturas indicadas devem ser mantidas <sup>[49]</sup>.

**Tabela 2** – Parâmetros a verificar ao longo do processo de compostagem – temperatura, tempo de tratamento e números de revolvimentos (Adaptado de *European Commission – Directorate-General Environment* <sup>[49]</sup>).

| Sistema de compostagem | Temperatura | Tempo de Tratamento | Revolvimentos |
|------------------------|-------------|---------------------|---------------|
| Pilhas revolvidas      | 55 °C       | 2 semanas           | 5             |
| Pilhas revolvidas      | 65 °C       | 1 semana            | 2             |
| Sistemas reator        | 60 °C       | 1 semana            | Não aplicável |

Relativamente ao conteúdo em metais pesados, no documento *“Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft”* <sup>[51]</sup> os compostos são classificados em três classes (1, 2 e resíduos biodegradáveis estabilizados) de acordo com o seu teor em metais pesados, sendo que o composto de Classe 1 pode ser aplicado no solo sem qualquer restrição específica, o composto

da Classe 2 deve ser usado em quantidade inferior a 30 toneladas de matéria seca por hectare numa média de 3 anos, e os resíduos orgânicos estabilizados apenas podem ser aplicados em solos que não estejam afetos à plantação de culturas destinadas à alimentação. Já nas Especificações Técnicas <sup>[51]</sup> os compostos são classificados em quatro classes (I, II, II A e III), também de acordo com o seu teor em metais pesados, sendo que o composto da Classe I e II pode ser utilizado, de um modo geral, na agricultura, o composto da Classe IIA pode ser aplicado em culturas agrícolas arbóreas e arbustivas e o composto da Classe III só pode ser utilizado em solos onde não se pretenda implementar culturas destinadas à alimentação (por exemplo, cobertura final de aterros e lixeiras, pedreiras e minas). Na Tabela 3 indicam-se os valores máximos admissíveis para os teores de metais pesados para as diferentes classes referidas nos dois documentos <sup>[49, 51]</sup>.

**Tabela 3** – Valores máximos admissíveis para os teores de metais pesados (Adaptado de “*Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft*” <sup>[49]</sup> e de “*Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto*” <sup>[51]</sup>).

|                                         |               | Biological Treatment of<br>Biowaste – 2nd draft * |     |                                          | Especificações Técnicas sobre<br>Qualidade e Utilizações do<br>Composto ** |     |      |      |
|-----------------------------------------|---------------|---------------------------------------------------|-----|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|
| Classe                                  |               | 1                                                 | 2   | Resíduo<br>biodegradável<br>estabilizado | I                                                                          | II  | II A | III  |
| Parâmetro<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) *** | Cádmio (Cd)   | 0,7                                               | 1,5 | 5                                        | 0,7                                                                        | 1,5 | 3    | 5    |
|                                         | Chumbo (Pb)   | 100                                               | 150 | 500                                      | 100                                                                        | 150 | 300  | 500  |
|                                         | Cobre (Cu)    | 100                                               | 150 | 600                                      | 100                                                                        | 200 | 400  | 600  |
|                                         | Crómio (Cr)   | 100                                               | 150 | 600                                      | 100                                                                        | 150 | 300  | 600  |
|                                         | Mercúrio (Hg) | 0,5                                               | 1   | 5                                        | 0,7                                                                        | 1,5 | 3    | 5    |
|                                         | Níquel (Ni)   | 50                                                | 75  | 150                                      | 50                                                                         | 100 | 200  | 200  |
|                                         | Zinco (Zn)    | 200                                               | 400 | 1500                                     | 200                                                                        | 500 | 1000 | 1500 |

\* Valores normalizados a 30 % de matéria orgânica

\*\* Valores normalizados a 40 % de matéria orgânica no caso dos RSU e 50 % no caso das lamas de ETAR

\*\*\* Massa seca

No que se refere ao grau de higienização, o documento “*Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft*” <sup>[49]</sup> estabelece que as bactérias *Salmonella* spp. devem estar ausentes em 50 g de composto e a bactéria *Clostridium perfringens* deve estar ausente em 1 g de composto, para que o composto esteja higienizado. Por sua vez, as Especificações Técnicas <sup>[51]</sup> estabelecem também a necessidade da ausência de *Salmonella* spp. em 25 g de composto e *Escherichia coli* com um NMP/g igual ou inferior a 1000 para que o composto possa ser considerado como higienizado.

As impurezas e as pedras são quase sempre parte integrante do composto, pelo que também são regulados os valores máximos admissíveis da sua presença. Na Tabela 4 reproduzem-se esses limites.



**Tabela 4** – Valores máximos admissíveis para impurezas ou materiais inertes antropogénicos e pedras (Adaptado de “*Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft*”<sup>[49]</sup> e de “*Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto*”<sup>[51]</sup>).

|                                  |                                                 | <i>Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft</i> |      |                                    | <i>Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto</i> |     |      |     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----|------|-----|
| Classe                           |                                                 | 1                                                   | 2    | Resíduo biodegradável estabilizado | I                                                                        | II  | II A | III |
| Parâmetro (mg kg <sup>-1</sup> ) | Impurezas ou materiais inertes antropogénicos * | <0,5                                                | <0,5 | <3                                 | 0,5                                                                      | 1,0 | 2,0  | 3,0 |
|                                  | Pedras, > 5 mm (%)                              | <5                                                  | <5   | -                                  | 5                                                                        | 5   | 5    | -   |

\* Inclui vidro, metais e plásticos cujas partículas apresentem uma granulometria superior a 2mm.

Nas Especificações Técnicas<sup>[51]</sup> são colocadas mais algumas restrições quanto a outros elementos, tais como:

- ✓ Teor de humidade – inferior a 40 %;
- ✓ Granulometria – 99 % do material deverá passar por um crivo de malha quadrada de 25 mm, quando o composto se destina à agricultura;
- ✓ Matéria orgânica – superior a 30 % (em peso seco);
- ✓ pH – entre 5,5 e 8,5

O documento “*Biological Treatment of Biowaste – 2nd draft*”<sup>[49]</sup> refere também um parâmetro não especificado no documento português que é a pesquisa de germinação de infestantes e de partes de plantas com capacidade germinativa em composto. Este documento refere que o composto deve conter menos de 3 sementes de infestantes por litro de amostra.

No que se refere ao grau de maturação do composto, o documento das Especificações Técnicas refere que o mesmo é avaliado em laboratório através da realização de testes de autoaquecimento em vasos Dewar e, em função do seu grau de maturação, consideram-se 3 categorias de composto, como se pode observar na Tabela 5.

**Tabela 5** – Categorias de composto em função do grau de maturação (Adaptado de “*Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto*”<sup>[51]</sup>).

| Temperaturas atingidas no teste de autoaquecimento em vasos Dewar (°C) | Graus de maturação | Categoria do Composto |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| T < 40                                                                 | IV e V             | Maturado              |
| 40 < T < 50                                                            | III                | Semi-maturado         |
| T > 50                                                                 | I e II             | Fresco                |

Como já foi referido nesta secção, o composto proveniente do processo de compostagem pode ser classificado como ecológico, se lhe for atribuído, pelas suas qualidades e características, um rótulo ecológico. A Decisão da Comissão n.º 2007/64/CE “estabelece os critérios ecológicos revistos e os respetivos requisitos de avaliação e verificação para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos suportes de cultura”. Nos constituintes orgânicos do suporte de cultura candidato à aquisição de um rótulo ecológico o teor de alguns metais pesados, medidos na base seca, deve ser inferior aos referidos na Tabela 6.

**Tabela 6** – Valores máximos admissíveis para teores de metais pesados no composto com rótulo ecológico (Adaptado de Comité do Rótulo Ecológico da União Europeia <sup>[53, 54]</sup>)

| Elemento        | VMA (mg kg <sup>-1</sup> ) * | Elemento           | VMA (mg kg <sup>-1</sup> ) * |
|-----------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Arsénio (As) ** | 10                           | Mercúrio (Hg)      | 1                            |
| Cádmio (Cd)     | 1                            | Molibdénio (Mo) ** | 2                            |
| Chumbo (Pb)     | 100                          | Níquel (Ni)        | 50                           |
| Cobre (Cu)      | 100                          | Selénio (Se) **    | 1,5                          |
| Crómio (Cr)     | 100                          | Zinco (Zn)         | 300                          |
| Flúor (F) **    | 200                          |                    |                              |

\* Matéria seca

\*\* A presença destes elementos só é analisada se os produtos contiverem materiais provenientes de processos industriais.

Relativamente aos microrganismos patogénicos foram também definidos limites máximos admissíveis para que o composto seja classificado como ecológico. A *Salmonella* spp deverá estar ausente em 25 g de composto, os ovos de helmintas deverão estar ausentes em 1,5 g de composto e a *Escherichia coli* deverá ter um NMP por grama de composto inferior a 1000. No que diz respeito à germinação de infestantes e à presença partes de plantas com capacidade germinativa no composto é definido o limite de duas unidades por litro. Os contaminantes físicos apenas são permitidos caso tenham uma granulometria inferior a 2 mm e um teor em vidro, plástico ou metal inferior a 0,5 % de massa seca <sup>[53, 54]</sup>.

## 1.4. COMPOSTAGEM DOMÉSTICA

A compostagem doméstica, embora seja o modelo de compostagem mais antigo, não é uma prática muito comum nos dias de hoje, mas continua a ser uma forma prática e pouco dispendiosa de valorizar os resíduos orgânicos, alimentares, de jardinagem ou de hortas, numa habitação ou numa escola, evitando que os mesmos sejam depositados num aterro ou sejam encaminhados para centrais de compostagem nas quais o custo associado à sua valorização é bastante elevado.

Para se fazer compostagem doméstica, ao contrário do que muitas vezes se pensa, nem sempre é estritamente necessário utilizar um compostor. O material orgânico a compostar pode ser amontoado em forma de pirâmide (pilha) num pequeno lugar num jardim ou quintal, com um diâmetro da base de 2 m e uma altura de pelo menos 1 m para que o processo de

decomposição ocorra de forma adequada, e por forma a prevenir perdas excessivas de calor. No entanto, a utilização de um compostor é vantajosa, quer por questões de logística e estética, quer pela otimização que proporciona ao processo, nomeadamente na retenção do calor resultante do metabolismo dos microrganismos que é essencial ao processo. Assim, têm vindo a ser concebidos e comercializados vários compostores em todo o mundo. Entre os diferentes modelos de compostor, varia essencialmente o tipo de material com que são construídos (madeira, plástico e metal), a sua capacidade assim como a quantidade e formato dos orifícios que promovem a entrada de ar e de microrganismos <sup>[55]</sup>. No Anexo IV apresentam-se alguns exemplos de compostores domésticos comercializados na atualidade.

Os compostores devem ser colocados em locais com algumas particularidades, tais como: fácil acesso, meia sombra, proteção do vento, que permitam o contacto com a terra, que estejam próximos de uma fonte de água, entre outras <sup>[56]</sup>.

De um modo geral, através da compostagem doméstica pode-se compostar todos os resíduos orgânicos produzidos nas habitações/escolas, embora se deva evitar a adição de alguns materiais que, pelas suas características e pela sua natureza, podem prejudicar o processo, as pessoas e o ambiente, na medida em que atraem animais ou causam a morte aos microrganismos decompositores. São exemplos desses resíduos os seguintes: alimentos cozinhados, ossos e espinhas, fezes de animais domésticos, resíduos de jardim tratados com pesticidas ou herbicidas, entre outros. Os materiais mais comumente adicionados aos compostores são: (1) aparas de relva, folhas verdes, legumes e frutas, borras de café, plantas e sacos de chá (resíduos ricos em azoto) e (2) aparas de madeira, palha ou feno, folhas secas, pequenos ramos e cascas de batata (resíduos ricos em carbono). A utilização destes materiais deve-se ao facto de os mesmos conseguirem garantir as condições nutricionais necessárias ao processo, serem facilmente biodegradáveis e não apresentarem contaminação <sup>[33, 55, 56]</sup>.

Uma vez instalado o compostor, pode-se proceder à adição dos resíduos, habitualmente colocados em camadas alternadas de resíduos ricos em azoto e resíduos ricos em carbono, devendo a última camada ser de resíduos ricos em carbono, para evitar problemas de libertação de odores e a proliferação de insetos e outros animais indesejáveis. Na base do compostor é adequado adicionar uma camada de pequenos ramos, por forma a facilitar o arejamento e impedir a compactação. Para que o processo de compostagem se inicie mais rapidamente poderá adicionar-se um pouco de composto já pronto ou de terra, que conterá uma boa quantidade de microrganismos para iniciar o processo.

Ao longo do processo é conveniente proceder-se à monitorização dos parâmetros referidos no subcapítulo 1.3. No entanto, existem algumas diferenças a acautelar.

No que se refere ao arejamento, o mesmo deve ser efetuado 2 a 3 vezes por semana, em dias alternados e ao longo de todo o processo, essencialmente quando o processo decorre dentro de um compostor, pois nesse caso os resíduos não estão permanentemente em contacto com o ar. O revolvimento dos resíduos é efetuado, naturalmente, de forma manual. Relativamente ao teor de humidade, habitualmente neste tipo de processo é controlado de uma forma muito pouco científica, através do “teste da esponja” que consiste em apertar com a mão uma certa quantidade de material e verificar se escorre água (humidade em excesso), se apenas humidifica a mão (humidade adequada) ou se a mão permanece seca (baixo teor de

humidade) <sup>[33, 55]</sup>. Esta situação verifica-se pelo facto de os responsáveis pelo controlo da compostagem doméstica serem habitualmente cidadãos sem formação e recursos adequados para efetuar a medição do teor de humidade recorrendo aos métodos normalizados. A temperatura é habitualmente medida com um termómetro (com maior ou menor precisão). Neste tipo de processo é muito difícil conseguir atingir temperaturas termofílicas porque: (1) como os resíduos são adicionados à medida que vão sendo produzidos, durante algumas semanas a quantidade de resíduos é insuficiente para que se estabeleça a atividade microbiana, e ao longo de todo o processo os resíduos encontraram-se em diferentes estágios de decomposição; (2) alguns compostores não contêm dimensões otimizadas que permitam o desenvolvimento do processo evitando perdas térmicas. No que se refere ao pH, não é habitualmente monitorizado.

Para que o processo seja mais célere os resíduos a compostar devem ser cortados em partículas com dimensões compreendidas entre os 5 e os 7 cm <sup>[55]</sup>.

Quando todo o material colocado no compostor ficar com uma cor escura e odor semelhantes à terra, atingir a temperatura ambiente e tiver granulometria homogénea (não se consegue identificar o material inicial) significa que o processo de degradação terminou e o composto está praticamente pronto. Este processo pode demorar entre 3 a 6 meses, dependendo das condições em que o mesmo decorre <sup>[56]</sup>. Se forem atendidas as necessidades nutricionais dos materiais a compostar, os mesmos forem de pequena dimensão, for mantido o nível ótimo de humidade e se fizer o revolvimento com frequência, o composto poderá estar pronto em 2 ou 3 meses. Após esta fase o composto deve ser armazenado algumas semanas para que se obtenha um produto totalmente estável e com elevado grau de maturação, que poderá ser aplicado em hortas, jardins, vasos e sementeiras. As vantagens da aplicação deste composto no solo são as já referidas no subcapítulo 1.3.7. deste documento. Como é habitual nos processos de compostagem, na compostagem doméstica surgem problemas como os odores, o excesso ou a falta de humidade, temperaturas muito baixas e pragas, embora alguns deles com mais frequência.

No entanto, o principal problema no controlo da compostagem doméstica prende-se com o facto de não se conseguir atingir temperaturas que promovam a higienização do material orgânico, o que poderá acarretar problemas para as pessoas e para o ambiente, na medida em que o composto produzido não será um composto higienizado e, por isso, pode conter microrganismos patogénicos.

## **1.5. A AMBISOUSA**

A Ambisousa é uma Empresa Intermunicipal de Tratamento e Gestão de Resíduos Sólidos, EIM, que trata e gere os resíduos urbanos da população da região do Vale do Sousa, estimada em 337 000 habitantes. Esta região abrange um total de seis municípios: Castelo de Paiva, Felgueiras, Lousada, Paços de Ferreira, Paredes e Penafiel.

Esta empresa tem a sua sede no município de Lousada, e tem por objetivo “a exploração da atividade de recolha, transferência, tratamento e deposição de resíduos sólidos, de tratamento e rejeição de efluentes, e de limpeza e higiene públicas, na área geográfica do Vale do Sousa” <sup>[57]</sup>. No entanto, na prática, a atividade da Ambisousa tem-se focado no Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos produzidos nos seis municípios que integram a Valsousa – Associação de Municípios do Vale do Sousa – e na triagem de resíduos dentro da mesma área geográfica.

No que se refere a infraestruturas, a Ambisousa funciona em dois polos distintos, um em Lousada e outro em Penafiel. Em Lousada, mais propriamente na freguesia de Lustosa, estão em funcionamento um aterro sanitário, uma estação de triagem e uma central de valorização energética de biogás. Em Penafiel, existem estas mesmas instalações, às quais se acrescenta o aterro de inertes de Rio Mau.

No aterro sanitário de Lustosa são depositados os resíduos provenientes dos municípios de Felgueiras, Lousada e Paços de Ferreira. Este aterro, que foi inicialmente projetado para um tempo de vida útil de 10 anos e com uma capacidade de encaixe de 420 000 toneladas de resíduos, atingiu precocemente no início do ano de 2004 a sua capacidade limite. Com vista a contornar esse facto, foram feitas duas reestruturações nas quais se construíram novas células. Destas, uma apenas entrou em funcionamento em 2014, tendo um tempo de vida útil previsto de 5 anos. No aterro sanitário de Penafiel são depositados os resíduos provenientes dos concelhos de Castelo de Paiva, Paredes e Penafiel. Este aterro foi construído ocupando uma área de deposição de 5,4 hectares e entrou em funcionamento em 1999, tendo atingido em 2003, 53% da sua capacidade. Entretanto, em 2006 foi feita uma ampliação do setor Norte, e em 2007 do setor Sul. Em ambos os aterros o lixiviado é encaminhado para lagoas, onde é alvo de homogeneização e oxigenação, sendo depois encaminhado diretamente para uma Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). É também produzida eletricidade a partir do biogás gerado, em ambos os aterros. Em ambas as centrais de triagem faz-se a triagem e o armazenamento temporário do material reciclável, sendo depois encaminhados para recicladores através da Sociedade Ponto Verde (SPV). O refugo resultante deste processo é depositado nos aterros. O aterro de Inertes de Penafiel foi inaugurado em 2010, e abrange uma área total de 3,5 hectares, correspondentes à área de uma antiga louseira. Para deposição de resíduos, compreende uma área de 18 886 m<sup>2</sup>, sendo que a Ambisousa fará a recuperação ambiental da área total do aterro <sup>[58]</sup>.

O desempenho financeiro da empresa, apesar da conjuntura económica que o país atravessa nos últimos anos, permitiu que em 2012 a tarifa praticada para a deposição de RSU fosse das mais baixas do país, apesar do aumento da taxa de gestão de resíduos <sup>[58]</sup>.

No ano de 2012, na Região do Vale do Sousa, foram produzidas 126 572,50 toneladas de resíduos urbanos (incluindo RCD), das quais 59 846,32 foram confinadas no aterro sanitário de Lustosa e 59 495,60 no aterro sanitário de Penafiel. Verificou-se que em termos de RSU, provenientes de recolha indiferenciada, houve uma diminuição da sua produção de cerca de 3,3 % face ao ano anterior, o que se traduziu na produção de 118 644,02 toneladas. O restante correspondeu a refugos das estações de triagem, tendo sido depositadas 255,28 toneladas de refugo no aterro sanitário de Penafiel e 442,62 toneladas no aterro sanitário de Lustosa <sup>[58, 59]</sup>.

Dos RSU encaminhados para aterro, verificou-se que em 2012 a tendência se manteve: a fração mais significativa foi a dos resíduos putrescíveis (40,5 %), seguida da fração de plásticos (12,0 %) e de papel/cartão (7,4 %). O vidro correspondeu a 3 %, os metais a 1,8 %, a madeira a 0,7 %, os compósitos a 4,1 %, os têxteis a 8,6 %, os têxteis sanitários a 8,1 %, os finos a 11,7 % e, uma pequena fração de outros resíduos, correspondeu a 2,1 % <sup>[10]</sup>.

O município com maior produção de resíduos foi o de Paredes, sendo o município com mais população residente. A capitação diária do conjunto dos seis municípios situou-se numa média de 0,96 kg/hab/dia (Anexo V) <sup>[58 – 60]</sup>.

Relativamente ao material proveniente de recolha seletiva, verificou-se em 2012 uma diminuição significativa de 15,2 % das entradas desses materiais. A empresa justifica esta queda com a situação económica e financeira que o país atravessa bem como com a existência de mercados paralelos que desviam material. O papel/cartão e o vidro representam para a Ambisousa as fileiras mais preponderantes, que representam cerca de 78 % do material recolhido de forma seletiva. Assim, em 2012 foram recolhidas seletivamente 7 688,58 toneladas de material que compreende plásticos, papel/cartão, vidro, embalagens metálicas, madeira, sucata, equipamentos elétricos e eletrónicos e colchões. O município de Paredes foi também o que mais contribuiu para a reciclagem (Anexo V) <sup>[58]</sup>.

Embora o principal objetivo da empresa seja, de facto, o tratamento e gestão dos resíduos produzidos na Região do Vale do Sousa, a empresa tem também uma grande responsabilidade social. Neste domínio, a empresa aderiu ao Projeto Tampinhas, que tem como objetivo promover a recolha de tampas de plástico que são posteriormente encaminhadas para empresas de reciclagem e, a verba daí obtida, é aplicada na compra de material ortopédico destinado a pessoas com carências socioeconómicas. A Ambisousa promoveu também a campanha “2 causas por 1 causa”, que teve como objetivo a obtenção de uma verba para doação à Associação Laço, e o projeto Vale do Sousa solidário que consistiu na recolha de materiais como roupa, brinquedos e manuais escolares que foram entregues a instituições de solidariedade social na região do Vale do Sousa <sup>[57]</sup>.

Como já foi referido, os RSU recolhidos indiferenciadamente são compostos maioritariamente por resíduos orgânicos (fração putrescível). Dado este facto, a empresa tem-se visto obrigada a implementar medidas que promovam a valorização deste tipo de resíduos para que diminua a sua quantidade em aterro devido aos problemas que a mesma acarreta. Assim, em 2009, a empresa deu início ao projeto de compostagem doméstica. Inicialmente o projeto apenas se aplicou ao município de Paços de Ferreira mas, entretanto, já se alargou aos municípios de Penafiel e Lousada. Nos restantes municípios apenas foram distribuídos compostores nos estabelecimentos de ensino. Em julho de 2013 tinham sido já distribuídos 1102 compostores. Este projeto consiste na atribuição de compostores domésticos às habitações que reúnam condições para efetuar o processo de compostagem, e na monitorização e acompanhamento da utilização do compostor, por forma a conduzir a resultados benéficos para a empresa, do ponto de vista do desvio efetivo de RUB dos aterros. Neste domínio, a Ambisousa tem vindo também a investigar a possibilidade de construir uma Unidade de Tratamento Mecânico-Biológico, para tratar os RU provenientes de recolha indiferenciada. O principal objetivo da empresa com a construção desta unidade será proceder à recuperação da fração reciclável dos

RU, e diminuir a fração orgânica depositada em aterro. A construção desta unidade deverá avançar nos próximos anos, mas na atualidade ainda se encontra em projeto.

## **1.6. OBJETIVOS**

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar a viabilidade da aplicação de processos de compostagem a resíduos orgânicos, na empresa Ambisousa, como forma de desviar os resíduos urbanos biodegradáveis do aterro, valorizando a matéria orgânica que resultará do tratamento mecânico de resíduos urbanos provenientes de recolha indiferenciada que a empresa pretende implementar e promovendo a compostagem doméstica.

Para dar cumprimento ao objetivo principal, desenvolveram-se estudos experimentais com um sistema não-reator, simulando a compostagem industrial e utilizando matéria orgânica proveniente de uma estação de tratamento mecânico-biológico, assim como se realizaram estudos com compostores domésticos e resíduos domésticos aplicáveis, simulando a compostagem doméstica.

## **1.7. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos principais.

No Capítulo 1, já apresentado, é feito um enquadramento geral do tema, no qual se descreve a situação atual de Portugal no que se refere à gestão RU, particularizando a gestão dos RUB. Depois, é feita uma descrição do processo de compostagem, indicando os seus objetivos, vantagens e desvantagens, quais os parâmetros que afetam o processo e de que forma se podem controlar, quais as tecnologias existentes, assim como se discriminam as principais questões relacionadas com a qualidade e aplicação do composto. Apresenta-se posteriormente um breve subcapítulo referente à compostagem doméstica e, por fim, faz-se uma breve descrição da empresa Ambisousa, onde foi desenvolvido o trabalho.

No Capítulo 2, Metodologia, apresenta-se a metodologia seguida para realização do trabalho experimental. No subcapítulo Materiais e Equipamentos, refere-se com detalhe os materiais e equipamentos que foram utilizados nos ensaios de compostagem, bem como os que se utilizaram nas determinações laboratoriais efetuadas. No subcapítulo Métodos, é feita uma descrição detalhada dos métodos aplicados, desde a montagem dos compostores, adição de resíduos aos mesmos, dimensionamento e construção das pilhas de compostagem, até aos métodos aplicados na monitorização do processo e na realização das análises laboratoriais efetuadas.

No Capítulo 3 apresentam-se os resultados obtidos relativamente aos parâmetros de controlo do processo de compostagem, bem como o resultado das análises efetuadas ao composto

final. É feita ainda uma análise crítica dos resultados, por forma a avaliar o processo e a qualidade do composto final.

No Capítulo 4 apresenta-se uma análise crítica do trabalho realizado e no Capítulo 5 faz-se um resumo do trabalho elaborado e dos resultados obtidos, bem como a sua avaliação global, respetivamente.

No Capítulo 6 apresentam-se propostas para a realização de trabalhos futuros.

Por fim, nos Capítulos 7 e 8 apresentam-se a bibliografia e os anexos, nos quais se apresenta, respetivamente, a bibliografia consultada assim como informação complementar relativa ao trabalho.



## 2 METODOLOGIA

Tendo em conta os objetivos definidos para este trabalho, a metodologia seguida na sua realização, apresenta-se esquematizada na Figura 16.

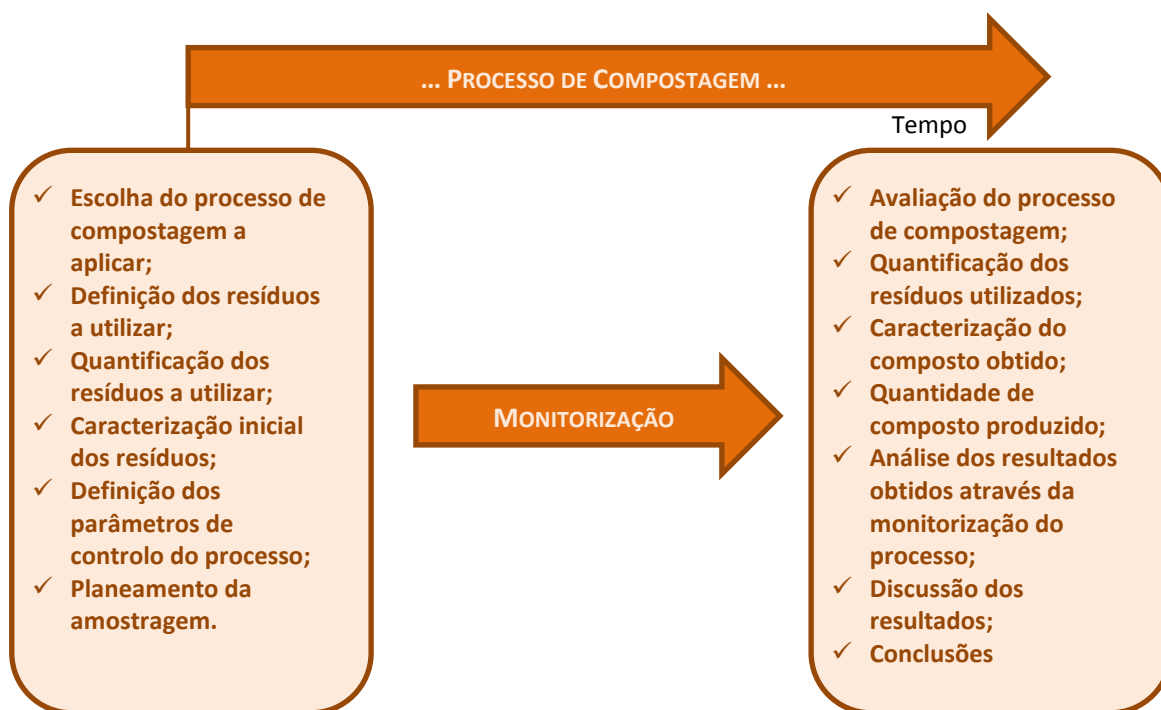


Figura 16 – Metodologia aplicada às atividades experimentais realizadas.

### 2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

#### 2.1.1. MATÉRIAS-PRIMAS

No trabalho da compostagem doméstica utilizaram-se essencialmente resíduos orgânicos provenientes de uma habitação e de um restaurante. Na Tabela 7 referem-se os principais tipos de resíduos adicionados, de acordo com a sua proveniência e tipo.

**Tabela 7** – Matérias-primas utilizadas nos ensaios de compostagem doméstica de acordo com a sua proveniência e tipo.

| Origem             | Resíduos Verdes                                                                                    | Resíduos Castanhos           |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Habitação</b>   | ✓ Aparas de relva frescas                                                                          | ✓ Palha                      |
|                    | ✓ Folhas verdes                                                                                    | ✓ Folhas secas               |
|                    | ✓ Legumes (feijão verde, alface, cenoura, tomate, ervilhas, couves, brócolos, favas, cebolas, ...) | ✓ Relva seca                 |
|                    | ✓ Frutas (maçã, banana, nêspersas, morangos, laranja/tangerina, pêra, ...)                         | ✓ Pequenos ramos de videiras |
|                    | ✓ Borra de café                                                                                    | ✓ Cascas de batata           |
|                    | ✓ Sacos de chá                                                                                     |                              |
|                    | ✓ Cascas de ovos                                                                                   |                              |
|                    | ✓ Pão                                                                                              |                              |
|                    | ✓ Arroz                                                                                            |                              |
|                    |                                                                                                    |                              |
| <b>Restaurante</b> | ✓ Cebolas                                                                                          | ✓ Cascas de batatas          |
|                    | ✓ Limão                                                                                            |                              |
|                    | ✓ Cascas de alho                                                                                   |                              |
|                    | ✓ Borrás de café                                                                                   |                              |

Relativamente aos ensaios de compostagem em pilhas, a matéria-prima utilizada foi a fração orgânica proveniente da Central de Tratamento Mecânico-Biológico da Resinorte <sup>(61)</sup>. Utilizou-se esta matéria-prima por ser aquela que mais se assemelharia à que no futuro resultará do tratamento mecânico dos resíduos provenientes de recolha indiferenciada que a Ambisousa pretende implementar. Como estruturante utilizou-se serrim de madeira.

### 2.1.2. COMPOSTORES

Para a realização deste trabalho experimental utilizaram-se 3 compostores da marca *Domplex* <sup>[62]</sup>, por serem os compostores que a empresa Ambisousa distribui pelas habitações para a prática da compostagem doméstica.

O compostor *Domplex*, representado na Figura 17, é constituído por uma tampa, uma porta, uma base (perfurada) e o corpo. As dimensões externas do compostor são 725 x 725 x 1000 mm e a sua capacidade útil é de 300 L.



**Figura 17** – Compostor *Domplex* <sup>[62]</sup>.

### **2.1.3. ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS A COLOCAR NOS COMPOSTORES**

Os resíduos verdes provenientes da habitação foram diariamente depositados numa caixa fechada e os resíduos castanhos foram recolhidos, mediante a sua disponibilidade, para dentro de caixas abertas, como se demonstra na Figura 18.



**a)** Caixa de resíduos verdes



**b)** Caixa de resíduos castanhos

**Figura 18** – Caixas para deposição e transporte dos resíduos verdes e castanhos.

Os resíduos provenientes do restaurante foram armazenados e transportados dentro de sacos plásticos.

A preparação dos resíduos a compostar requereu a utilização dos seguintes materiais e equipamentos:

- ✓ Balança - pesagem das matérias-primas;
- ✓ Tesoura de poda – redução do tamanho dos resíduos (5 – 7 cm);
- ✓ Luvas – manipulação dos resíduos;
- ✓ Pá pequena – manipulação dos resíduos.

#### **2.1.4. TRANSPORTE DOS RESÍDUOS A COLOCAR NAS PILHAS E MONTAGEM DAS MESMAS**

Os resíduos cedidos pela Resinorte foram transportados por um camião da Ambisousa até ao Aterro de Lustosa, onde foi realizado o trabalho experimental.

Para construir as pilhas de compostagem foi necessário o seguinte material:

- Balança;
- Contentor;
- Pá;
- Fita métrica;
- Tela em Polietileno de Alta Densidade (PEAD).

#### **2.1.5. AMOSTRAGEM**

No processo de recolha de amostras para analisar em laboratório, ao longo de todo o processo, utilizou-se uma pá de pequena dimensão, uma balança, sacos de plástico para acondicionamento e transporte das amostras, fita-cola para selagem dos sacos e um marcador para identificação.

#### **2.1.6. MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO E DETERMINAÇÃO DA QUALIDADE DO COMPOSTO**

Na Tabela 8 encontra-se uma listagem do material e equipamento necessário para a monitorização do processo e a determinação da qualidade do composto.

**Tabela 8** – Material e equipamento utilizado para monitorização do processo e determinação da qualidade do composto.

| Parâmetro                                               | Material e equipamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Determinação da Temperatura</b>                      | ✓ Sonda de temperatura com um termómetro digital microprocessador <i>Delta OHM-HD 9016</i>                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Revolvimento nos compostores</b>                     | ✓ Ancinho                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Revolvimento nas pilhas</b>                          | ✓ Pá<br>✓ Fita métrica (para reconstrução da pilha)                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Determinação da Humidade</b>                         | ✓ Balança analítica ( <i>Sartorius M-power</i> , erro $\pm 0,1$ mg, máx. 210 g);<br>✓ Caixas de Petri;<br>✓ Espátula;                                                                                                                                                                                                                       | ✓ Estufa;<br>✓ Exsiccador.                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Ajuste da humidade</b>                               | ✓ Regador                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Determinação do pH</b>                               | ✓ Espátula;<br>✓ Matrizes de 300 mL;<br>✓ <i>Gobelets</i> ;<br>✓ Balança analítica ( <i>Sartorius M-power</i> , erro $\pm 0,1$ mg, máx. 210 g);                                                                                                                                                                                             | ✓ Agitador orbital ( <i>P-Selecta Rotabit</i> );<br>✓ Água destilada;<br>✓ Eléctrodo medidor de pH e temperatura ( <i>CRISON pH meter GLP 21</i> ).                                                                                                                                              |
| <b>Determinação da condutividade</b>                    | ✓ Espátula;<br>✓ Matrizes de 300 mL;<br>✓ <i>Gobelets</i> ;<br>✓ Balança analítica ( <i>Sartorius M-power</i> , erro $\pm 0,1$ mg, máx. 210 g);                                                                                                                                                                                             | ✓ Agitador orbital ( <i>P-Selecta Rotabit</i> );<br>✓ Água destilada;<br>✓ Eléctrodo medidor de condutividade ( <i>CRISON conductimeter GLP 31</i> ).                                                                                                                                            |
| <b>Determinação da matéria orgânica</b>                 | ✓ Balança analítica ( <i>Sartorius M-power</i> , erro $\pm 0,1$ mg, máx. 210 g);<br>✓ Estufa;<br>✓ Cadinhos de Porcelana;                                                                                                                                                                                                                   | ✓ Espátula;<br>✓ Mufla;<br>✓ Exsiccador.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Análises da fitotoxicidade do composto</b>           | ✓ Pá;<br>✓ Vasos de 300 mL;<br>✓ Turfa;<br>✓ Composto;<br>✓ Sementes de Azevém ( <i>lolium multiflorum</i> );                                                                                                                                                                                                                               | ✓ Medida de 1 L;<br>✓ Marcador;<br>✓ Estufa;<br>✓ Tabuleiros;<br>✓ Balança analítica ( <i>Sartorius M-power</i> , erro $\pm 0,1$ mg, máx. 210 g).                                                                                                                                                |
| <b>Análise microbiológica – <i>Escherichia Coli</i></b> | ✓ 30 caixas de Petri com meio de cultura <i>Lauryl Sulphate Broth</i> ;<br>✓ 6 tubos de ensaio com meio confirmativo <i>Fluorocult</i> ;<br>✓ Tubos Duran;<br>✓ Solução salina;<br>✓ Frascos Schott (500 mL);<br>✓ Agitadores magnéticos e barras;<br>✓ Balança ( <i>Kern EW</i> , erro $\pm 0,1$ g, máx. 1500 g);<br>✓ 15 tubos de ensaio; | ✓ Micropipeta manual e pontas estéreis;<br>✓ Agitador vortex;<br>✓ Bico de Bunsen;<br>✓ Filtros de membrana <i>Sartorius</i> (nitrato de celulose, 0,45 $\mu$ m de porosidade e 47 mm de diâmetro);<br>✓ Sistema de filtragem + bomba;<br>✓ Câmara de UV;<br>✓ Reagente Kovacs ( <i>Merck</i> ). |
| <b>Análise granulométrica</b>                           | ✓ Peneiros (malhas: 37,5 mm; 25,00 mm; 14,00 mm; 5,00 mm; 2,36 mm);<br>✓ Peneiradora vibratória;                                                                                                                                                                                                                                            | ✓ Balança analítica ( <i>Sartorius M-power</i> , erro $\pm 0,1$ mg, máx. 210 g);<br>✓ <i>Gobelet</i> .                                                                                                                                                                                           |

## **2.2. MÉTODOS**

### **2.2.1. MONTAGEM DOS COMPOSTORES DOMÉSTICOS**

No processo de montagem dos 3 compostores a utilizar (réplicas) a primeira etapa foi a escolha do local ideal para a sua colocação. O local escolhido foi um local com fácil acesso, relativamente protegido do vento, perto de uma fonte de água e com alguma sombra durante o dia. Os compostores foram instalados em contacto com a terra, para facilitar a entrada dos microrganismos essenciais ao processo.

Os compostores *Domplex* são constituídos por 3 peças distintas, que facilmente se encaixam.

### **2.2.2. PREPARAÇÃO E ADIÇÃO DE RESÍDUOS AOS COMPOSTORES**

A adição dos resíduos aos compostores foi feita de forma faseada, mediante a produção e disponibilidade dos mesmos, tal como acontece no processo de compostagem doméstica nas habitações. Durante todo o processo (2 meses e 2 semanas), nunca se conseguiu ocupar mais do que 1/3 do compostor. Antes de serem colocados nos compostores, os resíduos passaram por um pequeno processo de preparação, que incluía uma inspeção visual, a diminuição do tamanho e pesagem. A inspeção visual teve como objetivo detetar e remover resíduos que, por lapso, foram colocados nas caixas/sacos de recolha mas que não devem ser adicionados aos compostores. Foi feita uma diminuição do tamanho dos resíduos, a 5 – 7 cm, para facilitar a sua degradação. A pesagem dos resíduos é fundamental para se saber a relação entre a quantidade de resíduos adicionados e a quantidade de composto produzido, sendo que a todos os compostores foi adicionada a mesma quantidade de todos os resíduos.

Dos resíduos adicionados aos compostores, dois deles foram adicionados não como matéria-prima, mas sim como auxiliares do processo de compostagem: os ramos de videiras foram utilizados apenas para forrar a base do compostor, como se pode observar na Figura 19, por forma a torná-la mais permeável à entrada de ar e de microrganismos, sendo que após o primeiro revolvimento, os ramos misturados com os restantes resíduos passam a ter uma função estruturante, para evitar a compactação e facilitar a circulação de ar, não sendo um objetivo a sua degradação; a palha adicionada tinha como principal função servir de cobertura aquando a colocação de resíduos frescos, para evitar odores e proliferação de pragas, como representado na Figura 19.



**Figura 19** – Visualização do interior dos compostores com cobertura da base com ramos de videira (à esquerda) e com palha na superfície dos resíduos (à direita).

No início do processo, procedeu-se à adição de uma pequena quantidade de terra para iniciar o mesmo, uma vez que contém uma boa quantidade de microrganismos.

### **2.2.3. CONSTRUÇÃO DAS PILHAS DE COMPOSTAGEM**

#### **2.2.3.1. PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS**

Uma vez que o parâmetro que se pretendeu estudar a influência foi o arejamento (variando a periodicidade do revolvimento), utilizou-se o mesmo tipo de resíduos nas 6 pilhas, ou seja, todas as pilhas foram construídas com a mesma matéria orgânica proveniente do tratamento mecânico e biológico de resíduos recolhidos indiferenciadamente, da Resinorte.

Não foi possível obter junto da empresa a caracterização deste resíduo. No entanto, consultando dados de outras empresas <sup>[63]</sup>, foi possível averiguar que a humidade deste resíduo (quando fresco) se situa nos 70 – 80 %. Assim sendo, considerando que o teor de humidade ótimo para que o processo de compostagem ocorra é de 50 % <sup>[20, 25]</sup>, optou-se pela adição de um estruturante – o serrim de madeira – por forma a que o mesmo absorva alguma humidade dos resíduos orgânicos, tentando equilibrar assim a humidade da mistura. O serrim de madeira também serve para evitar que haja compactação dos resíduos orgânicos. Relativamente a este resíduo, também não foi possível obter junto do fabricante as suas características, pelo que, uma vez mais, se recorreu aos dados existentes na literatura <sup>[41, 63]</sup>. Na Tabela 9 encontram-se então os valores dos parâmetros humidade e massa volúmica típicos para estes resíduos, encontrados na literatura.

**Tabela 9** – Massa volúmica e humidade dos resíduos utilizados <sup>[41, 63]</sup>.

| Resíduos                 | Massa volúmica (kg m <sup>-3</sup> ) | Humidade (% m/m) |
|--------------------------|--------------------------------------|------------------|
| <b>Orgânicos</b>         | 758 *                                | 70-80            |
| <b>Serrim de madeira</b> | 400                                  | 42               |

\* Valor estimado utilizando um recipiente de volume conhecido

O serrim de madeira utilizado foi adquirido numa serração de madeiras, não sendo um resíduo da sua atividade, mas sim um subproduto que é vendido às indústrias de produção de *pellets*. Assim sendo, a quantidade de material que puderam disponibilizar foi de apenas 180 kg, o que como se poderá verificar na Tabela 10 é muito pouco para corrigir o teor de humidade dos resíduos orgânicos.

Posto isto, e sendo o serrim o material em menor quantidade, optou-se por distribuir a sua totalidade pelas 6 pilhas, pelo que, cada pilha, foi construída com 30 kg de serrim. Em termos de matéria orgânica, cada pilha foi construída com 717 kg. Assim, no total, cada pilha continha 747 kg de material.

Com estes dados, foi possível estimar a densidade e a humidade da mistura de serrim com resíduos orgânicos em cada pilha (Tabela 10).

**Tabela 10** – Caracterização teórica da mistura de resíduos.

|                                                                        | Massa volúmica (kg m <sup>-3</sup> ) | Humidade (% m/m) |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| <b>Mistura de resíduos</b><br>(96 % Orgânicos / 4 % Serrim de madeira) | 743,7 **                             | 68,9 */**        |

\* Considerou-se um teor de humidade de 70 % para os resíduos orgânicos, uma vez que, quando foi colocado em pilha, o material já tinha estado armazenado durante uma semana num contentor aberto, dentro de um pavilhão, devido às condições atmosféricas que impediram a sua colocação em pilha no dia em que foi transportado para as instalações da Ambisousa.

\*\* Valores calculados através da média ponderada dos valores de humidade e densidade de cada um dos resíduos incorporados nas pilhas.

Os valores teóricos calculados, necessários para se obter um teor de humidade ótimo de acordo com a literatura, não foram possíveis de implementar, dada a diminuta quantidade de serrim disponível e a dimensão das pilhas necessária, por forma a permitir o eficiente desenvolvimento do processo, com perdas térmicas aceitáveis.

### 2.2.3.2. DIMENSIONAMENTO DAS PILHAS

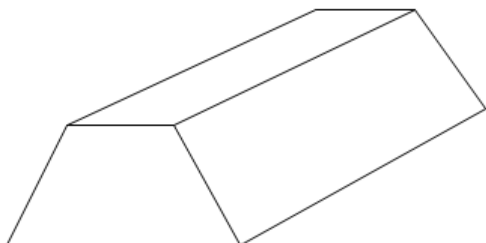
O dimensionamento das pilhas de compostagem deve ser feito tendo em conta as características e o volume do material a compostar, as condições climáticas do local, o espaço disponível para colocação das mesmas e o material existente para o seu manuseamento <sup>[22]</sup>.

As dimensões das pilhas devem permitir que as mesmas mantenham a sua integridade ao longo do processo <sup>[22]</sup>. Alguns autores referem que a largura da pilha deve ser



aproximadamente o dobro da sua altura <sup>[43]</sup>. Segundo Wilkinson, K. <sup>[64]</sup> o volume mínimo da pilha a adotar é de  $1 \text{ m}^3$  para que o processo seja considerado compostagem.

Com base nestas informações, construíram-se pilhas trapezoidais (Figura 20 a)) com um comprimento de 2,5 m, base maior de 1,5 m, base menor de 0,7 m e uma altura de 0,5 m. Com estas dimensões as pilhas construídas apresentavam um volume de  $1,375 \text{ m}^3$  (Figura 20 b)).



**a)** Formato das pilhas



**b)** Imagem das pilhas construídas

**Figura 20** – Formato e dimensões das pilhas de compostagem.

Optou-se por fazer o topo das pilhas achatado e não cónico pois uma vez que as pilhas eram para estar cobertas com tela ao longo de todo o processo não se corria o risco de acumularem água das chuvas. Com o topo achado as perdas de calor são menores <sup>[22]</sup>.

#### **2.2.3.3. CONSTRUÇÃO DAS PILHAS**

As pilhas de compostagem foram construídas nas instalações da Ambisousa, em Lustosa, mais propriamente num recinto de receção de resíduos (ecocentro) (Figura 21 a)).

Inicialmente, procedeu-se à pesagem dos materiais a incorporar em cada pilha, de acordo com os valores calculados anteriormente. Depois, os materiais foram colocados no chão e misturados manualmente com o auxílio de uma pá, sendo o serrim adicionado aos poucos, como se pode ver na Figura 21 b)).

Após a mistura, com o auxílio de uma pá manual, as pilhas foram construídas uma a uma, de acordo com as dimensões e o formato previstos (Figura 21 a)).



**a)** Local de colocação das pilhas de compostagem

**b)** Mistura dos materiais a incorporar nas pilhas

**Figura 21** – Local de construção das pilhas de compostagem e modo de mistura dos materiais a incorporar nas mesmas.

#### **2.2.4. AMOSTRAGEM**

O processo de recolha de amostras ao longo do processo de compostagem é um passo extremamente importante na análise dos seus parâmetros. Assim, sempre que houve necessidade de se recolher amostras das pilhas ou dos compostores para análises, seguiu-se o seguinte procedimento:

- a)** Identificaram-se os sacos de plástico com o nome da amostra e data de recolha, com um marcador;
- b)** Com o auxílio de uma pá pequena, procedeu-se à recolha das amostras, tentando sempre fazer com que as mesmas sejam representativas, isto é, antes de se retirar cada amostra, procedeu-se à mistura do material a analisar e só depois se recolheu a amostra;
- c)** Pesaram-se as amostras, com o auxílio de uma balança, e registou-se o seu peso;
- d)** Colocaram-se as amostras ao ar livre durante cerca de uma semana para perderem o odor;
- e)** Após esse período, fecharam-se os sacos e encaminharam-se as amostras para análise.

Após a recolha das amostras, e a sua pesagem, e antes das análises de humidade, estas foram colocadas a arejar por forma a perderem o odor, como se refere no ponto d), Para que os ensaios laboratoriais fossem possíveis em condições adequadas. No caso da recolha de amostras para as análises microbiológicas, as mesmas foram recolhidas para frascos Schott esterilizados.

## **2.2.5. MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO**

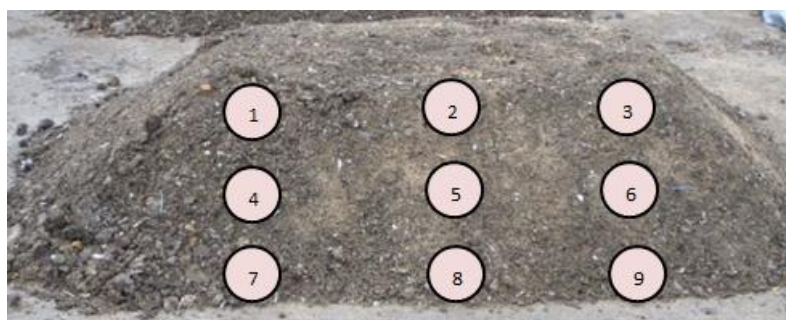
Por forma a assegurar que os processos de compostagem decorriam com as condições adequadas, foi realizada a monitorização dos seguintes parâmetros de controlo: temperatura, revolvimento e humidade.

### **2.2.5.1. TEMPERATURA**

No caso da compostagem doméstica, a determinação da temperatura foi efetuada com recurso a sonda, esporadicamente, tendo em conta que na maioria das habitações que têm um compostor atribuído é isso que acontece, nunca deixando um período de mais do que 7 dias sem efetuar a medição da temperatura. Os valores obtidos correspondem à temperatura no centro dos resíduos no interior do compostor. A temperatura apenas começou a ser monitorizada ao 10º dia de compostagem devido à necessidade de ter uma quantidade de resíduos razoável que permitisse a colocação do sensor de temperatura.

Nas pilhas de compostagem, a temperatura começou a ser monitorizada uma semana após a construção das mesmas. Neste caso, a temperatura foi medida em 9 pontos distintos da pilha, como se indica na Figura 22 a), sensivelmente de 2 em 2 dias, e sempre que possível à mesma hora.

Os resultados foram lidos diretamente no termómetro digital microprocessador utilizado (Figura 22 b)).



**a)** Pontos de medição da temperatura nas pilhas.



**b)** Termómetro digital microprocessador - Delta OHM-HD 9016.

**Figura 22** – Pontos de medição da temperatura nas pilhas de compostagem e equipamento utilizado para a sua medição em ambos os processos.

A temperatura ambiente também foi monitorizada nos locais de medição, com recurso ao mesmo equipamento.

#### **2.2.5.2. REVOLVIMENTO**

No processo a decorrer em compostores, o revolvimento foi efetuado 3 vezes por semana, com o auxílio de um ancinho <sup>[33, 55]</sup>. A cada revolvimento tentou-se fazer com que o material que estava na superfície ficasse no fundo e vice-versa, para que todos os materiais passassem pelas mesmas condições. O revolvimento foi efetuado de igual modo e com a mesma frequência em todos os compostores.

Na compostagem em pilhas, como já foi referido, o parâmetro variável entre os dois conjuntos de três pilhas foi o revolvimento. Assim, em três pilhas (P1A, P1B e P1C) o revolvimento foi feito de 2 em 2 semanas, independentemente da temperatura das pilhas, enquanto que nas restantes (P2A, P2B e P2C) a temperatura das pilhas é que determinou os momentos em que se fez o revolvimento. Neste caso, impôs-se que sempre a temperatura média da pilha descesse dos 30 °C, ou atingisse os 70 °C era efetuado um revolvimento.

De acordo com Kreith & Tchobanoglous <sup>[22]</sup>, o revolvimento deve ser efetuado destruindo a pilha que se pretende revolver e, em seguida, reconstruindo-a. Assim, garante-se que a camada externa da pilha passa para o interior e vice-versa, permitindo que todo o material fique sujeito às mesmas condições. Posto isto, com o auxílio de uma pá, foi precisamente dessa forma que se efetuou o revolvimento das pilhas (Figura 23).



**Figura 23** – Revolvimento das pilhas.

#### **2.2.5.3. TEOR DE HUMIDADE**

A determinação do teor de humidade foi efetuada em laboratório tendo por base a Norma EN 13040:2007.

##### **Procedimento Experimental:**

- a) Identificaram-se as caixas de Petri com o nome das amostras;

- b) Colocaram-se na estufa, a  $103 \pm 2$  °C, durante 3 h, e em seguida colocaram-se num exsicador durante 1 h;
- c) Pesaram-se as caixas de Petri e anotaram-se os valores obtidos ( $m_T$ );
- d) Colocou-se em cada caixa de Petri 50 g de amostra e anotou-se o peso do conjunto ( $m_w$ );
- e) Colocaram-se as caixas de Petri com as amostras na estufa, a  $103 \pm 2$  °C, durante cerca de 12 h;
- f) Retiraram-se os conjuntos da estufa para um exsicador e deixou-se arrefecer durante 1 h;
- g) Após 1 h pesaram-se os conjuntos e anotou-se o valor obtido ( $m_D$ ).

Os resultados do teor de humidade são calculados de acordo com a Equação 1 e são expressos em percentagem (%).

$$\text{Humidade (\%)} = \frac{m_w - m_D}{m_w - m_T} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

No caso dos compostores, a humidade, enquanto parâmetro de monitorização, foi controlada de acordo com o método que habitualmente se utiliza nas habitações, e que se denomina por “teste da esponja”. Este método consistiu em pegar com a mão numa determinada quantidade de material e apertar o mesmo. Se a mão ficasse apenas húmida significava que estava com um teor de humidade adequada. No caso de escorrer água na mão, significava que havia humidade em excesso no material, pelo que se deveria adicionar materiais secos, como palha ou folhas, e fazer o revolvimento com mais frequência para aumentar a evaporação. Por fim, caso a mão ficasse seca, adicionava-se um pouco de água à pilha de resíduos, com o auxílio de um regador.

## **2.2.6. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS RESÍDUOS E DO COMPOSTO PRODUZIDO**

As análises de humidade, pH, condutividade, matéria orgânica, granulometria e fitotoxicidade foram efetuadas no LEPABE-FEUP. As análises microbiológicas foram efetuadas no Laboratório de Microbiologia do Departamento de Engenharia Química da FEUP. As análises de metais pesados foram efetuadas no Laboratório de Solos e Plantas J. Quelhas dos Santos da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

### **2.2.6.1. TEOR DE HUMIDADE**

A determinação da humidade foi realizada tal como descrito no subcapítulo 2.2.4.3.

#### 2.2.6.2. DETERMINAÇÃO DO pH

A determinação do pH foi realizada de acordo com a Norma EN 13037:2011, considerando que as amostras tinham uma granulometria inferior a 20 mm.

##### Procedimento Experimental:

- a) Pesaram-se num *gobelet* quantidades de amostras equivalentes a 60 mL;
- b) Transferiram-se as amostras para matrizes de 300 mL;
- c) A cada amostra, adicionou-se 300 mL de água destilada;
- d) Taparam-se os matrizes e colocaram-se no agitador orbital durante 1 h, à temperatura ambiente, a 200 U/min;
- e) Deixou-se o material decantar e mediu-se o pH da solução obtida (Figura 24).



Figura 24 – Eléctrodo medidor de pH e temperatura (CRISON pH meter GLP 21).

#### 2.2.6.3. DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE

A condutividade das amostras de composto foi medida na solução obtida no ensaio de pH (conforme a Norma EN 13037:2011), utilizando um eléctrodo medidor de condutividade (Figura 25).



Figura 25 – Eléctrodo medidor de condutividade (CRISON conductimeter GLP 31).



#### **2.2.6.4. DETERMINAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA**

Para se proceder à determinação do teor em matéria orgânica, teve-se como base a Norma EN 13039:2011.

##### **Procedimento Experimental:**

- a) Colocaram-se os cadinhos de porcelana, devidamente identificados, na mufla a  $(550 \pm 5) ^\circ\text{C}$  durante 16 h;
- b) Ao fim das 16 h colocaram-se os mesmos num exsiccador durante 1 h e anotou-se o seu peso ( $m_0$ );
- c) Colocaram-se 5 g de amostra seca (proveniente da análise da humidade) em cada cadinho e anotou-se a massa do conjunto ( $m_1$ );
- d) Colocaram-se os cadinhos na mufla a cerca de  $(450 \pm 25) ^\circ\text{C}$ , durante 6 h;
- e) Retiraram-se os cadinhos da mufla e colocaram-se no exsiccador até atingir a temperatura ambiente;
- f) Pesaram-se os conjuntos e anotou-se o respetivo valor ( $m_2$ );

Os resultados do teor em matéria orgânica são calculados de acordo com a Equação 2 e são expressos em percentagem de matéria orgânica (%).

$$\text{MO (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

#### **2.2.6.5. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

##### **Procedimento experimental:**

- a) Montou-se o conjunto de peneiros em cima da peneiradora vibratória, sobrepondo-os por ordem crescente de abertura da malha;
- b) Pesaram-se 100 g de amostra (em duplicado) e colocaram-se no topo do conjunto de peneiros;
- c) Colocou-se a tampa no topo do conjunto de peneiros;
- d) Ajustou-se a velocidade de vibração e fez-se o peneiramento durante 10 minutos;
- e) Pesaram-se, individualmente, as frações de material retido em cada peneiro.

Nota: Entre análises os peneiros foram limpos cuidadosamente, utilizando-se, se necessário, ar comprimido.

Os resultados são dados em percentagem de composto retido em cada peneiro (%) e são calculados através da Equação 3.

$$\text{Fração}_{>X} = \frac{M_{\text{retida no peneiro } X}}{M_{\text{total}}} \times 100 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Fração<sub>>X</sub> – Percentagem de material retido no peneiro de malha X;

M<sub>total</sub> – Massa total de amostra.

#### 2.2.6.6. ANÁLISES DE FITOTOXICIDADE

Nestas análises utilizaram-se apenas 2 amostras de cada compostor e de cada pilha. Idealmente, dever-se-ia ter efetuado as análises em triplicado para cada amostra. No entanto, devido à limitação de recursos e de tempo não foi possível.

O procedimento seguido consistiu em semear 2 g de sementes de Azevém (*Lolium Multiflorum*), em vasos com 100 % de turfa e vasos com proporções de composto/turfa de 25/75 e 50/50, como se demonstra na Tabela 11.

**Tabela 11** – Proporções de composto e turfa utilizadas em cada vaso.

| Vaso | Amostra          | (% m/m) Composto | (% m/m) Turfa |
|------|------------------|------------------|---------------|
| 1    | Referência 1     | 0                | 100           |
| 2    | Referência 2     | 0                | 100           |
| 3    | Referência 3     | 0                | 100           |
| 4    | P1A <sub>1</sub> | 25               | 75            |
| 5    | P1A <sub>2</sub> | 50               | 50            |
| 6    | P1B <sub>1</sub> | 25               | 75            |
| 7    | P1B <sub>2</sub> | 50               | 50            |
| 8    | P1C <sub>1</sub> | 25               | 75            |
| 9    | P1C <sub>2</sub> | 50               | 50            |
| 10   | P2A <sub>1</sub> | 25               | 75            |
| 11   | P2A <sub>2</sub> | 50               | 50            |
| 12   | P2B <sub>1</sub> | 25               | 75            |
| 13   | P2B <sub>2</sub> | 50               | 50            |
| 14   | P2C <sub>1</sub> | 25               | 75            |
| 15   | P2C <sub>2</sub> | 50               | 50            |
| 16   | C1 <sub>1</sub>  | 25               | 75            |
| 17   | C1 <sub>2</sub>  | 50               | 50            |
| 18   | C2 <sub>1</sub>  | 25               | 75            |
| 19   | C2 <sub>2</sub>  | 50               | 50            |
| 20   | C3 <sub>1</sub>  | 25               | 75            |
| 21   | C3 <sub>2</sub>  | 50               | 50            |

Utilizaram-se vasos de plástico com perfurações na base, e colocaram-se os mesmos num local com boa exposição e protegido. As plantas foram regadas diariamente. A escolha da planta para efetuar os testes prende-se com o facto de o Azevém ser uma planta de rápido crescimento e não necessitar de cuidados especiais para crescer.



Após 15 dias, cortaram-se as plantas cerca de 2 cm acima do solo e colocaram-se numa estufa durante 24 h a 80 °C. No final, pesaram-se as amostras e anotou-se o valor obtido.

Os resultados são expressos em percentagem de produção de matéria seca, de acordo com *Gutezeichen Kompost RAL-GZ 251 (1992)* <sup>[65]</sup>, considerando-se:

- ✓ o composto não fitotóxico e suficientemente maturado, sendo possível a sua aplicação como corretivo orgânico, se a produção de biomassa da parte aérea na modalidade de 25 % for igual ou superior a 90 % da verificada na modalidade testemunha, e quando não se detetarem quaisquer sintomas anómalos nas plantas, como clorose ou necroses;
- ✓ o composto é apropriado para componente de suportes de culturas se a produção de biomassa da parte aérea da modalidade 50 % for superior a 90 % da observada na modalidade testemunha;
- ✓ o composto deve ser utilizado com restrições se a biomassa da parte aérea da modalidade 25 % for inferior a 90 % da modalidade testemunha.

#### **2.2.6.7. ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS**

Relativamente às análises microbiológicas, realizou-se a determinação da *Escherichia Coli*. Para a determinação deste parâmetro utilizou-se a metodologia da ISO 9308-1:2000 – “*Water quality – Detection and enumeration of Escherichia Coli and coliform bacterium*”.

##### **A. Preparação do material e das amostras a analisar**

1. Colocaram-se 90 mL de solução salina em cada um dos 3 frascos Schott de 500 mL;
2. Colocou-se uma barra magnética no interior de cada frasco;
3. Pesaram-se 10,00 g de amostra de composto para cada um dos frascos Schott;
4. Colocaram-se os frascos em agitação durante cerca de 30 minutos e, em seguida, deixou-se o composto decantar (Figura 26);
5. Procedeu-se à diluição das soluções obtidas.



**Figura 26** – Agitador magnético (*Heidolph MR 3000 D*) (à esquerda); Decantação do composto dentro de um frasco Schott (à direita).

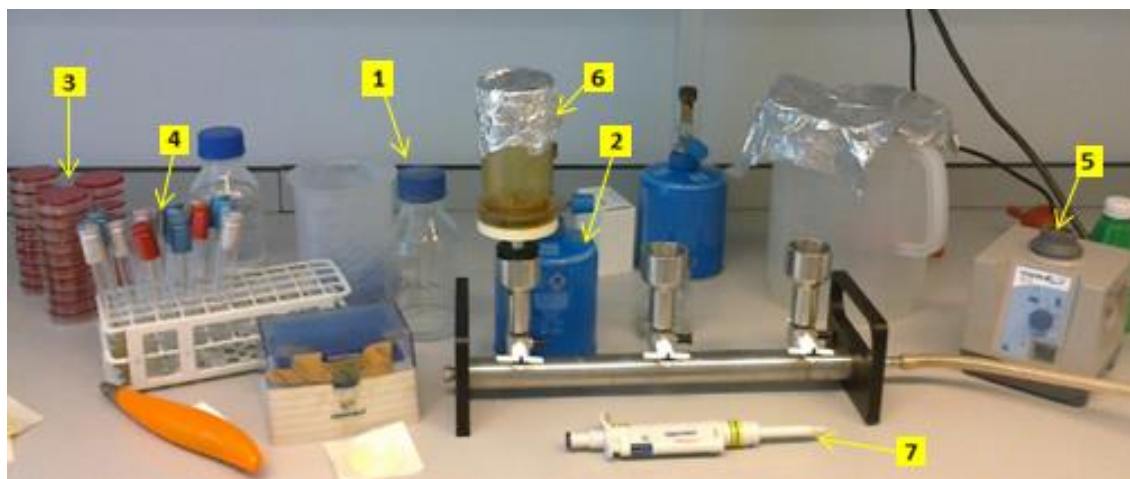
## B. Diluições

Efetuar-se 5 diluições ( $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ ) para cada amostra, de acordo com o seguinte procedimento:

1. Colocaram-se 9 mL de salina em cada um dos 15 tubos de ensaio (5 para cada amostra de composto);
2. Adicionou-se 1 mL de amostra ao 1º tubo de ensaio;
3. Após agitação em vórtice, retirou-se 1 mL do 1º tubo de ensaio e adicionou-se ao 2º. Procedeu-se de igual modo para os restantes tubos de ensaio, ou seja, retirando 1 mL da diluição imediatamente anterior e adicionando-o ao tubo de ensaio imediatamente a seguir.
4. Procedeu-se à filtração das amostras de cada tubo de ensaio.

## C. Filtração das amostras

1. Filtrou-se, através de uma membrana de filtração, 1 mL de amostra de cada tubo de ensaio utilizando os materiais representados na Figura 27;
2. Colocaram-se as membranas de filtração na respetiva caixa de Petri com meio de cultura *Lauryl Sulphate Broth*.



**Legenda:** 1 – Frasco Schott com salina; 2 – Bico de Bunsen; 3 – Meios de cultura; 4 – Tubos de ensaio com as diluições das amostras; 5 – Vortex; 6 – Copo de filtração; 7 – Micropipeta manual

**Figura 27** – Materiais utilizados na filtração das amostras.

**D. Teste 1 - Verificação da presença de *Escherichia Coli* em meio presuntivo (*Lauryl Sulphate Broth*)**

1. Incubaram-se as caixas com o meio *Lauryl Sulphate Broth* e as membranas de filtração durante 4 h a 30 °C e 14 h a 44 °C.
2. Após o período de incubação verificou-se a presença de colônias amarelas e rosa, considerando-se assim o teste positivo.

**E. Teste 2 - Verificação da presença de *Escherichia Coli* em meio confirmativo (*Fluorocult*)**

1. Para cada amostra, repicou-se uma colônia amarela e uma rosa para dois tubos de ensaio com meio *Fluorocult*, respetivamente;
2. Incubaram-se durante 24 h (ou 48 h, se necessário) a 35 °C;
3. Quando os meios passaram de roxo a amarelo, considerou-se positiva a presença de *E. Coli*;
4. Verificou-se a presença ou não de gás de fermentação no interior do tubo, considerando positiva a presença de *E. Coli* aquando da presença do gás.

**F. Teste 3 - Verificação da Fluorescência**

1. Após a incubação (48 horas), colocaram-se os tubos de ensaio na câmara de UV a 366 nm;
2. Quando foi verificada a fluorescência considerou-se o teste positivo.

**G. Teste 4 – Teste da Índole**

1. Adicionaram-se cerca de 5 mm de reagente Kovacs aos tubos de ensaio e verificou-se o aparecimento ou não de uma auréola vermelha ao fim de 1 a 2 minutos;
2. No caso de a mesma se verificar, considerou-se o teste positivo.



## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. MONITORIZAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

O processo de compostagem efetuado em compostores domésticos iniciou-se no dia 14 de março de 2014 e foi finalizado no dia 4 de junho, perfazendo um período total de 82 dias. O processo de compostagem em pilhas iniciou-se no dia 7 de abril de 2014 e foi finalizado no dia 12 de junho, tendo assim durado 66 dias.

Todos os resultados aqui apresentados foram obtidos através da análise de amostras recolhidas conforme indicado no subcapítulo 2.2.3. deste documento.

Na Tabela 12 apresentam-se as designações adotadas para as amostras analisadas.

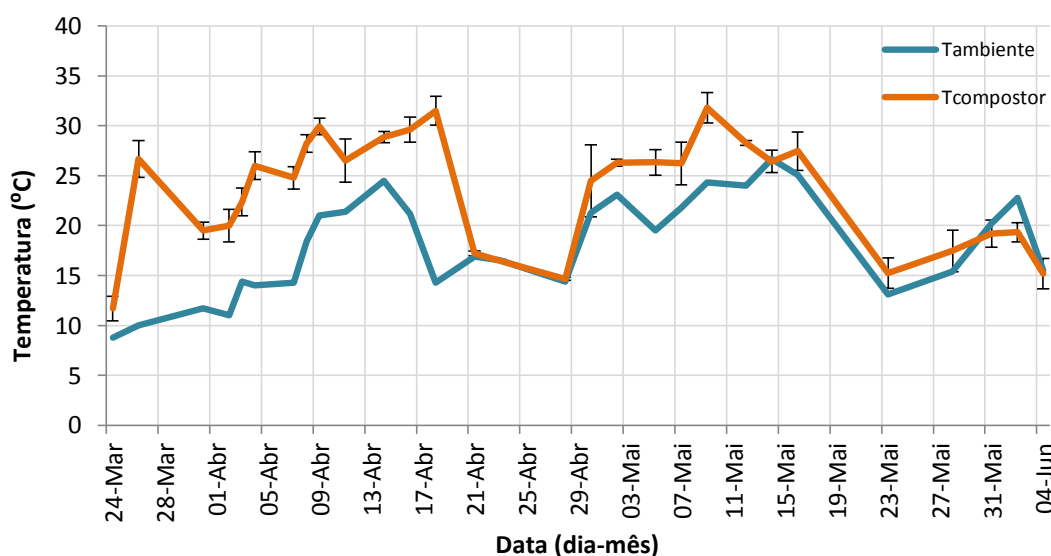
**Tabela 12** – Designação das amostras analisadas.

| Amostra | Designação                                                                                  |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| P1-A    | <b>P1</b> – revolvimento de 2 em 2 semanas<br>(3 réplicas – A, B e C)                       |
| P1-B    |                                                                                             |
| P1-C    |                                                                                             |
| P2-A    | <b>P2</b> – revolvimento de acordo com a variação da temperatura<br>(3 réplicas – A, B e C) |
| P2-B    |                                                                                             |
| P2-C    |                                                                                             |
| C1      | <b>C</b> – Compostores<br>(3 réplicas – 1, 2 e 3)                                           |
| C2      |                                                                                             |
| C3      |                                                                                             |

#### 3.1.1. TEMPERATURA

Como já foi sendo referido, a temperatura é o parâmetro que melhor traduz o equilíbrio biológico do processo de compostagem, determinando o tipo de microrganismos decompositores que se encontram nos materiais em compostagem, a taxa de degradação da matéria orgânica e a atividade metabólica. A temperatura é também muito importante para garantir a higienização <sup>[21]</sup>.

Como se pode observar na Figura 28, no caso da compostagem doméstica, no início do processo a temperatura aumentou consistentemente ao longo de cerca de 27 dias, atingindo um máximo de 32 °C no dia 19 de abril. Este aumento de temperatura deve-se à atividade metabólica dos microrganismos que, nesta fase, é mais intensa.



**Figura 28** – Evolução da temperatura (temperaturas médias e barras de erro relativamente ao desvio padrão) no centro dos compostores entre o 10º dia de compostagem e o final do processo.

A temperatura ambiente, como se pode observar, é um fator muito influente na variação da temperatura do processo, fazendo-a variar de igual modo e, por vezes, até mesmo coincidindo. É também observável que ao longo de todo o processo as temperaturas não atingiram valores característicos da fase termófila. Por este motivo, muito provavelmente o material destes compostores não ficou higienizado e, por isso, o composto produzido pode conter microrganismos patogénicos prejudiciais à saúde e ambiente. O facto de não se terem atingido temperaturas características da fase termófila deve-se essencialmente à reduzida quantidade de resíduos dentro dos compostores, que nunca chegou a ultrapassar 1/3 da sua capacidade devido à quantidade de resíduos disponível e à degradação dos mesmos, e também ao tipo de compostores utilizados que não permitem otimizar alguns parâmetros fundamentais do processo, para que os microrganismos decomponham eficazmente a matéria orgânica, tais como o arejamento e a humidade. Uma possível razão também justificativa deste fenómeno é a possível esterilidade da mistura de resíduos inicial ou a existência de uma população microbiana reduzida, que levará mais tempo a desenvolver-se e decompor os materiais <sup>[21]</sup>. A pequena massa em compostagem que caracteriza estes compostores, origina uma elevada dissipação de calor, sobretudo para temperaturas mais elevadas, o que poderá explicar também o baixo nível de temperaturas, sempre inferiores a 32 °C.

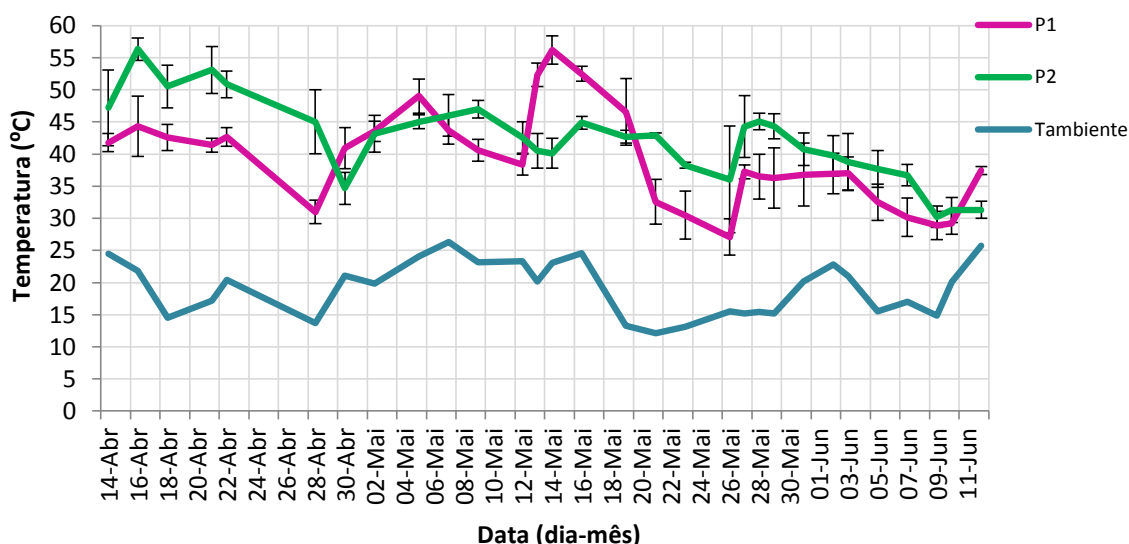
Era de esperar que os revolvimentos efetuados tivessem uma influência significativa na temperatura do processo, no entanto, verificou-se que a temperatura após alguns revolvimentos sofria um pequeno aumento, nunca superior a 5 ou 6 °C, como se pode observar no gráfico para os dias 1, 3, 7 e 29 de abril e 7, 14 e 23 de maio. No entanto, alguns destes aumentos de temperatura coincidiram como aumento da temperatura ambiente.

Através da análise do desvio padrão pode verificar-se a concordância dos resultados das réplicas analisadas. De referir apenas a medição efetuada no dia 30 de abril, cujas diferenças encontradas poder-se-ão dever a uma colocação errada da sonda de temperatura.

Ao longo do processo foi também perceptível a existência de uma relação entre a temperatura e o aparecimento de organismos de maiores dimensões no interior dos compostores. Verificou-se que, sempre que a temperatura ultrapassava os 20 °C, o material no interior do compostor era povoado por uma quantidade elevada de mosquitos e de bichas-cadelas (*Forficula auriculária*), dificultando por vezes a manipulação dos materiais. Por outro lado, sempre que havia um arrefecimento maior das temperaturas surgiam algumas lesmas.

No que se refere ao processo de compostagem em pilhas é importante referir que as pilhas estiveram cobertas com tela de PEAD ao longo de todo o processo, por forma a evitar perdas térmicas assim como afetação por condições meteorológicas mais adversas.

Na Figura 29 apresenta-se a evolução da temperatura nos processos 1 e 2 e da temperatura ambiente no local onde as pilhas foram construídas.



**Figura 29** – Evolução da temperatura no processo de compostagem 1 e 2 (temperaturas médias e barras de erro relativamente ao desvio padrão) entre o 7º dia de compostagem e o final do processo.

Observando a Figura 29 é possível perceber a influência que a temperatura ambiente tem na temperatura das pilhas. Por exemplo entre os dias 23 e 28 de Abril verificou-se uma descida das temperaturas em ambas as pilhas, coincidente com a descida da temperatura ambiente.

Na primeira medição da temperatura, ao 7º dia de compostagem, verificou-se que a temperatura em ambos os processos era já superior a 40 °C, pelo que os mesmos se encontravam já na fase termófila ou a entrar nesta fase. A temperatura continuou a subir, atingindo um máximo de cerca de 45 °C no processo 1 e 57 °C no processo 2, ao 9º dia de compostagem. A partir deste ponto a temperatura começou a decrescer, até aos revolvimentos efetuados. Tal como referido por Simujide, H. et al. <sup>[66]</sup> a subida da temperatura nesta fase inicial deve-se à grande quantidade de calor que é produzida pelos microrganismos na degradação dos compostos mais simples, como os açúcares e os aminoácidos. No entanto,

este autor refere nos seus estudos que as temperaturas se mantiveram elevadas inicialmente durante 30 dias após a construção das pilhas, o que neste caso não se verificou.

O 1º revolvimento no processo de compostagem 1 (P1) 1 foi efetuado no dia 28 de abril, ou seja, ao 21º dia de compostagem. Daí em diante os revolvimentos foram efetuados de 2 em 2 semanas, independentemente das temperaturas verificadas.

Após o 1º revolvimento verifica-se que a temperatura sofreu um aumento até valores muito próximos de 50 °C, seguindo-se novamente uma diminuição gradual dos valores. Quando foi efetuado o 2º revolvimento, no dia 12 de maio, a temperatura encontrava-se ligeiramente abaixo de 40 °C. A este revolvimento seguiu-se um acentuado aumento da temperatura, atingindo-se um pico máximo de cerca de 56 °C, ao 3º dia após o mesmo. De salientar que após este 2º revolvimento, as temperaturas mantiveram-se acima dos 50 °C durante 5 dias, sendo este o período em que se registaram temperaturas mais elevadas no processo 1. À data do 3º revolvimento, a temperatura no processo 1 era de cerca de 27 °C, sendo que este foi o valor mais baixo registado ao longo da monitorização da compostagem neste processo. O acentuado decréscimo da temperatura das pilhas do processo 1 entre o 2º e o 3º revolvimentos deve-se também ao acentuado decréscimo que a temperatura ambiente registou nesse intervalo de tempo, descendo de 25 °C para cerca de 13 °C. O 3º revolvimento originou um aumento na temperatura, embora menos acentuado do que nos revolvimentos anteriores, o que nos indica que o processo já se encontra mais perto do fim. Ao longo de 8 dias a temperatura manteve-se acima dos 35 °C, sem oscilações, começando depois a decrescer.

O último revolvimento no processo de compostagem 1 foi efetuado no dia 9 de junho e originou novamente um aumento da temperatura, mais uma vez coincidente também com a temperatura ambiente. De recordar que as pilhas de ambos os processos se encontravam cobertas com tela e num local bastante ensolarado, pelo que é provável que haja uma maior retenção de calor. Não foi possível efetuar o registo da temperatura após o dia 12 de junho, no entanto prevê-se a sua tendência à estabilização, estando próximo o fim do processo de degradação, ao qual se deveria seguir um processo de maturação do composto, que neste ensaio não se concluiu. Na pilha 1 não se atingiram durante tempo suficiente temperaturas elevadas para permitir a higienização. Este facto indica que não houve uma higienização correta do material obtido (composto).

Relativamente ao processo de compostagem 2 (P2), os revolvimentos foram efetuados de acordo com a temperatura, sempre que esta apresentava um decréscimo sem ter ainda atingido temperaturas suficientemente elevadas, necessárias à higienização do composto.

O 1º revolvimento das pilhas do processo 2 foi efetuado no dia 30 de abril, 23º dia de compostagem, devido ao decréscimo de 10 °C da temperatura do processo em apenas 2 dias. Após este revolvimento, as temperaturas subiram atingindo um máximo de apenas 47 °C. Ao longo dos dias que se seguiram, até ao 2º revolvimento a temperatura oscilou entre os 35 e os 45 °C, sem alterações acentuadas.

O 2º revolvimento foi efetuado no dia 21 de maio, após cerca de 10 dias de decréscimo da temperatura. Após este revolvimento, a temperatura manteve a tendência decrescente



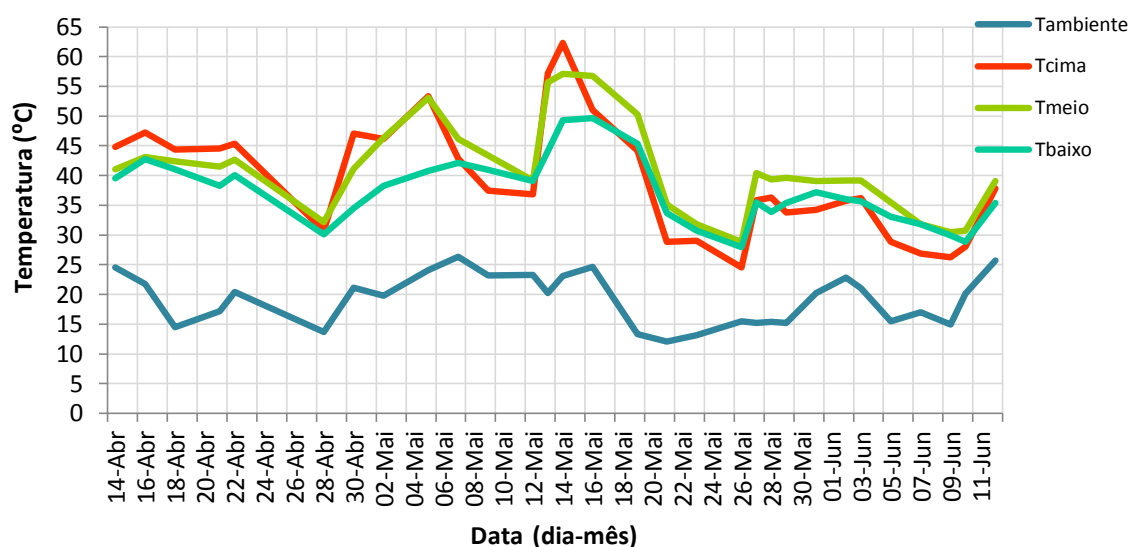
durante 5 dias, aumentando depois de forma acentuada cerca de 10 °C. A descida da temperatura após o revolvimento é atribuída à grande quantidade de calor que é perdida devido ao revolvimento ser feito manualmente, o que faz com seja necessário um determinado intervalo de tempo para que haja acumulação de calor para subir novamente a temperatura. Esta observação, de certa forma, vai de encontro ao referido no estudo de Qian, X. et al. <sup>[67]</sup>.

O último revolvimento foi efetuado no dia 5 de junho e, uma vez mais, a temperatura só verificou uma tendência crescente 5 dias após o mesmo, parecendo estabilizar para valores pouco superiores a 30 °C. A partir deste momento não foi possível prosseguir com a monitorização da temperatura, no entanto, é provável que a mesma tenda a estabilizar, iniciando-a fase de maturação, como referido por Simujide, H. et al. <sup>[66]</sup>. Como se pode verificar, de igual modo no processo 2 parecem não se ter atingido temperaturas de higienização durante tempo suficiente para garantir a correta higienização do material.

De um modo geral, procedendo-se à comparação das temperaturas das pilhas em ambos os processos, verifica-se que o processo 2 atingiu temperaturas mais elevadas do que o processo 1 ao longo de praticamente todo o período de monitorização, o que era de esperar, uma vez que os revolvimentos foram feitos tendo em conta as necessidades do processo. Verifica-se também que a variação da temperatura no processo 2 apresenta um comportamento claramente descendente, enquanto que no processo 1 a variação da temperatura é mais irregular, mas com tendência decrescente também.

Atendendo ao desvio padrão apresentado para ambos os processos verifica-se que as diferenças entre réplicas devem-se essencialmente à heterogeneidade do material, que se traduz numa heterogeneidade da distribuição da temperatura, o que seria de esperar. Pequenas variações podem também relacionar-se com um ligeiro desvio na colocação do termopar.

Como já foi referido no subcapítulo 2.2.4.1., nas pilhas de compostagem a temperatura foi medida em 9 pontos distintos: 3 na superfície das pilhas, 3 no meio e 3 na sua base. Na Figura 30 apresenta-se o gráfico que ilustra a variação da temperatura média das pilhas do processo 1 à superfície, no meio e na sua base.

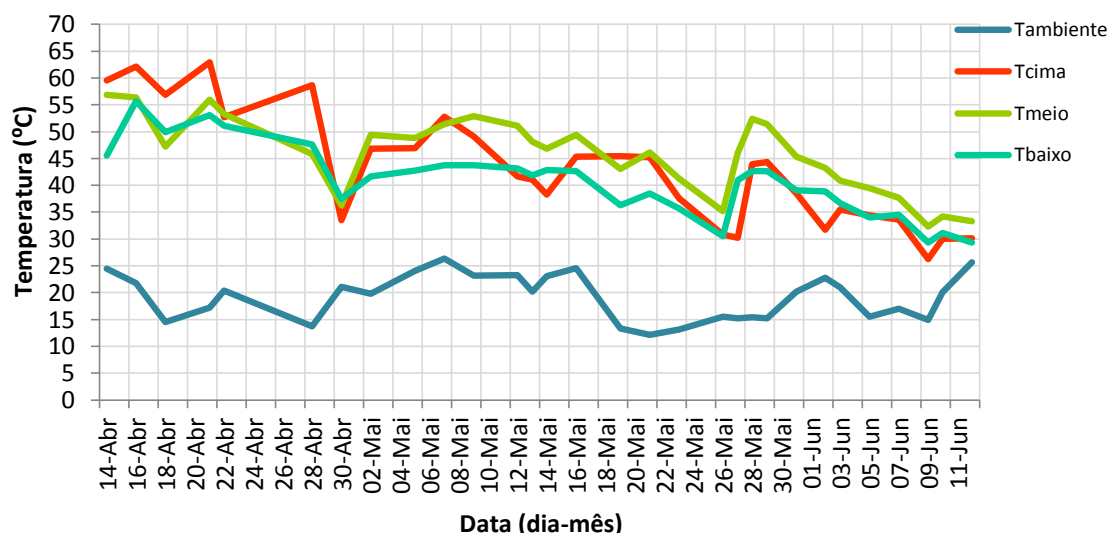


**Figura 30** – Variação média da temperatura na superfície, no meio e na base das pilhas do processo 1 (com coeficiente de variação inferior a 22,1 %).

Tendo por base o que foi referido no subcapítulo 1.3.5.2.1., e observando a Figura 30, verificou-se que nem sempre as temperaturas foram mais elevadas no meio das pilhas e mais baixas na periferia. Até ao primeiro revolvimento (28 de abril) verificou-se que a temperatura foi sempre mais elevada na superfície cerca de 4 °C em relação à temperatura no meio. No meio a temperatura foi sempre ligeiramente superior à temperatura da base. As temperaturas mais elevadas à superfície podem justificar-se com o facto de haver um certo efeito de insolação devido à cobertura com tela. Na base as perdas de calor são maiores, daí a temperatura ser menor.

Esta distribuição de temperaturas continuou a verificar-se até cerca de 4 dias após o primeiro revolvimento, momento a partir do qual a temperatura no meio da pilha passou a ser superior, situação que se verificou até ao fim da monitorização do processo, e que se deve às reduzidas perdas de calor que habitualmente se verificam no interior da pilha de compostagem. De notar que ao longo deste período houve um pico de temperatura superior a 60 °C medido na superfície da pilha. Como já foi referido, na superfície da pilha houve sempre um certo efeito de insolação, neste caso potenciado pelo aumento da temperatura ambiente e pelo revolvimento efetuado no dia 12 de maio. Entre o dia 20 de maio e o dia 12 de junho verificou-se que a temperatura na superfície da pilha foi sempre inferior à temperatura do meio, e em relação à temperatura na base, por vezes foi superior. Estas oscilações devem-se essencialmente à maior dificuldade de homogeneização dos materiais, que pode conduzir a uma desigual decomposição dos resíduos.

Na Figura 31 apresenta-se o gráfico correspondente à variação média da temperatura na superfície, no meio e na base das pilhas do processo de compostagem 2.



**Figura 31** – Variação média da temperatura na superfície, no meio e na base das pilhas do processo 2 (com coeficiente de variação inferior a 33,1 %).

Como se pode observar na Figura 31, até ao 1º revolvimento (30 de abril) as temperaturas foram superiores na superfície das pilhas e foram semelhantes entre si e inferiores no meio e na sua base. Estes valores devem-se, uma vez mais, ao referido efeito de insolação que a tela provoca na superfície e, as discrepâncias nos valores, devem-se a uma mais difícil homogeneização do material. Após o 1º revolvimento e até ao final do processo, tal como esperado de acordo com o que foi referido no subcapítulo 1.3.5.2.1., a temperatura foi sempre superior no meio das pilhas do que nas periferias, o que se deve ao facto de no interior das pilhas as perdas de calor resultante da atividade dos microrganismos serem muito menores. Após o 2º revolvimento verificou-se que as temperaturas na superfície e na base das pilhas foram sempre muito próximas, o que se deverá essencialmente a uma melhor homogeneização do material nessa fase do processo, resultante da degradação dos materiais e dos revolvimentos já efetuados.

### 3.1.2. HUMIDADE

Como já foi referido, fez-se um controlo do teor de humidade ao longo de ambos os processos de compostagem. No entanto, devido a questões de logística, apenas foi possível efetuar duas análises de humidade no processo de compostagem doméstica (uma da mistura inicial e outra do composto) e três análises no processo de compostagem em pilhas (uma à mistura inicial, outra cerca de um mês após o início da compostagem e uma última análise ao composto produzido). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 13.

**Tabela 13** – Resultados da monitorização do teor de Humidade.

|                      |                                     | 14-05-2014        |            | 04-06-2014       |            | 12-06-2014       |            |            |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|------------|------------------|------------|------------------|------------|------------|
| Amostra              | Humidade da mistura inicial (% m/m) | Humidade (% m/m)  |            | Humidade (% m/m) |            | Humidade (% m/m) |            |            |
|                      |                                     | $(\bar{x} \pm s)$ |            |                  |            |                  |            |            |
|                      |                                     |                   |            |                  |            |                  |            |            |
| C1                   | 82,9 ± 1,4                          | -                 |            | 77,9 ± 0,8       | 79,6 ± 1,5 | -                |            |            |
| C2                   |                                     |                   |            | 80,5 ± 0,8       |            |                  |            |            |
| C3                   |                                     |                   |            | 80,5 ± 2,5       |            |                  |            |            |
| P1A1<br>P1A2<br>P1A3 | 68,9 * /<br>50,8 ± 1,1<br>**        | 40,3 ± 4,9        | 43,0 ± 4,3 | -                | -          | 43,1 ± 3,8       | 45,1 ± 3,4 |            |
| P1B1<br>P1B2<br>P1B3 |                                     | 42,3 ± 2,5        |            |                  |            | 46,2 ± 3,1       |            |            |
| P1C1<br>P1C2<br>P1C3 |                                     | 46,3 ± 4,1        |            |                  |            | 45,9 ± 3,9       |            |            |
| P2A1<br>P2A2<br>P2A3 |                                     | 48,4 ± 4,1        | 50,1 ± 3,7 |                  |            | 36,6 ± 4,6       | 41,5 ± 5,9 |            |
| P2B1<br>P2B2<br>P2B3 |                                     | 48,6 ± 3,6        |            |                  |            |                  |            | 40,1 ± 3,1 |
| P2C1<br>P2C2<br>P2C3 |                                     | 53,4 ± 0,7        |            |                  |            |                  |            | 47,7 ± 3,4 |

\* Valor calculado com base no teor de humidade dos resíduos constituintes da mistura, que constam da literatura (ver subcapítulo 2.2.3.A)

\*\* Valor obtido através de determinação laboratorial

No que respeita ao processo de compostagem doméstica, verifica-se que os resíduos utilizados ao longo do processo, aquando da sua colocação nos compostores, apresentavam um teor médio de humidade de 82,9 ± 1,4 %. No final do processo, decorridos cerca de dois meses e meio, verificou-se que o teor de humidade no composto foi de 77,9 % na amostra do compostor 1 e 80,5 % nas amostras dos compostores 2 e 3, o que se traduz numa humidade média do composto de 79,6 %. Observa-se assim que a perda de humidade ao longo do processo foi de cerca de 4 %, valor que se revela demasiado baixo. Em parte este valor era expectável uma vez que, como já foi referido, em nenhum compostor se atingiram temperaturas superiores a 35 °C e os compostores utilizados apresentam a desvantagem de terem apenas aberturas de dimensões muito reduzidas na tampa, o que se traduz numa reduzida evaporação de água e, consequentemente, na retenção de água por parte dos materiais. A pouca evaporação que por vezes se verificou acabava por condensar na tampa e nas laterais dos compostores, regressando novamente ao processo. Outro fator que contribuiu para que o teor de humidade se mantivesse alto é o facto de na compostagem doméstica os resíduos terem sido adicionados ao longo do processo. Ora, se a sua humidade inicial era de 82,9 %, sempre que adicionados ao processo originavam um aumento do teor de humidade na mistura. De um modo geral, os valores de humidade são demasiado altos quando comparados

com o teor de humidade ótima para a compostagem, que se situa entre os 50 e os 60 %<sup>[25]</sup>. Para valores superiores a 65 %, os poros existentes no material ficam saturados com água e dificultam a movimentação de ar, criando condições de anaerobiose<sup>[21]</sup>.

No que se refere ao teor de humidade no composto obtido na compostagem doméstica (79,6 %) verifica-se que o mesmo é bastante superior ao especificado no documento das Especificações Técnicas<sup>[51]</sup>, no qual refere que o composto deverá apresentar um teor de humidade inferior a 40 %.

O teor de humidade da mistura inicial utilizada no processo de compostagem em pilhas, apresentado na Tabela 13 com um valor de 68,9 %, foi calculado com base no teor de humidade dos resíduos constituintes da mistura, encontrados na literatura (ver subcapítulo 2.2.3.A). No momento da constituição das pilhas de compostagem, recolheram-se três amostras da mistura inicialmente utilizada e procedeu-se à análise do teor de humidade em laboratório, tendo-se obtido um valor de 50,8 %. Como se pode constatar, este valor difere cerca de 18,1 % do valor estimado com base nos valores indicados na literatura. No entanto, o valor determinado analiticamente encontra-se dentro da gama considerada ótima.

Cerca de um mês após o início do processo realizou-se a determinação do teor de humidade, tendo-se obtido para as pilhas 1 um valor cerca de 15,4 % inferior ao valor inicial da mistura em todas as amostras, e para as pilhas 2 a diminuição foi de apenas 1,4 %. As diferenças verificadas entre as P1 e as P2 devem-se essencialmente ao facto de as P1 terem sido revolvidas 2 dias antes da recolha das amostras, o que contribuiu para a perda de algum teor de água. Outro fator que conduziu a estes resultados foi a temperatura, sendo que à data de recolha das amostras as temperaturas nas pilhas 1 ultrapassavam os 60 °C, favorecendo assim a perda de água, enquanto que nas pilhas 2 os valores oscilavam entre os 40 e os 50 °C, resultando em perdas de água menores. Os valores de desvio padrão verificados devem-se à heterogeneidade das pilhas de compostagem, nomeadamente no que se refere ao perfil de temperaturas, o que se traduz em teores de humidade diferentes consoante o local da pilha.

## **3.2. QUALIDADE DO COMPOSTO**

Apresentam-se neste subcapítulo os resultados obtidos através das análises e determinações efetuadas ao composto produzido em ambos os processos de compostagem aplicados, e ainda uma comparação dos vários parâmetros obtidos, sempre que possível, com os valores legislados indicados no subcapítulo 1.3.7. ou referidos na bibliografia consultada.

### **3.2.1. HUMIDADE**

Observando os teores de humidade no composto produzido (valores a negrito na Tabela 13) verifica-se que, de um modo geral são inferiores ao valor inicial da mistura de resíduos, no entanto quando comparados com o valor previsto nas Especificações Técnicas<sup>[51]</sup>, que refere que o teor de humidade no composto final deve ser inferior a 40 %, verifica-se que nenhuma

das amostras cumpre com esse valor, sendo que o composto produzido nas pilhas 1 apresenta uma humidade média de 45,1 % e o das pilhas 2 de 41,5 %. Desta forma pode afirmar-se que o composto em estudo carece ainda de uma fase de maturação.

### 3.2.2. GRANULOMETRIA

Na Tabela 14 apresentam-se os resultados obtidos relativamente à granulometria dos compostos obtidos.

**Tabela 14** – Massa total de amostra analisada e quantidade de amostra retida em cada peneiro.

| Amostra         | Massa inicial (g) | Abertura da malha (mm) / massa retida (g) |            |             |             |             |             | Total de massa retida (g) | Perdas (%) |
|-----------------|-------------------|-------------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|------------|
|                 |                   | 37,5                                      | 25         | 14          | 5           | 2,36        | < 2,36      |                           |            |
| P1-A            | 105,2             | 0,0                                       | 0,0        | 16,6        | 31,0        | 27,5        | 28,9        | 104,0                     | 1,1        |
| P1-B            | 104,0             | 0,0                                       | 0,0        | 18,5        | 30,1        | 25,3        | 29,5        | 103,4                     | 0,6        |
| P1-C            | 105,2             | 0,0                                       | 0,0        | 11,9        | 31,0        | 30,1        | 31,2        | 104,2                     | 1,0        |
| <b>P1-média</b> | <b>104,8</b>      | <b>0,0</b>                                | <b>0,0</b> | <b>15,7</b> | <b>30,7</b> | <b>27,6</b> | <b>29,9</b> | <b>103,9</b>              | <b>0,9</b> |
| P2-A            | 107,2             | 0,0                                       | 0,0        | 2,9         | 35,9        | 33,2        | 34,5        | 106,5                     | 0,7        |
| P2-B            | 107,9             | 0,0                                       | 0,0        | 11,9        | 31,5        | 30,4        | 32,9        | 106,7                     | 1,1        |
| P2-C            | 104,0             | 0,0                                       | 0,0        | 7,1         | 34,3        | 29,4        | 32,6        | 103,4                     | 0,6        |
| <b>P2-média</b> | <b>106,4</b>      | <b>0,0</b>                                | <b>0,0</b> | <b>7,3</b>  | <b>33,9</b> | <b>31,0</b> | <b>33,3</b> | <b>105,5</b>              | <b>0,8</b> |

Analisando a Tabela 14 verifica-se que a granulometria do material não é totalmente homogénea, mas todo o material apresentou granulometria inferior a 25 mm, o que significa que cumpre com o valor definido nas Especificações Técnicas que refere que, no caso de o composto se destinar à agricultura, 99 % do material deverá passar por um crivo de malha quadrada de 25 mm <sup>[51]</sup>. As perdas verificadas devem-se essencialmente ao facto de algum material ficar retido nos peneiros, sendo posteriormente removido com auxílio de ar comprimido.

Na Tabela 15 indica-se a percentagem de amostra retida em cada peneiro. Procedendo-se à sua análise, conclui-se que em ambas as amostras a menor fração retida corresponde a partículas com granulometria superior a 14 mm e inferior a 25 mm, havendo no entanto uma acentuada diferença entre a amostra P1 e a amostra P2. Verifica-se que no que respeita às restantes granulometrias o material se encontra distribuído de forma praticamente equitativa. Em ambas as amostras a granulometria com maior expressão é a superior a 5 mm e inferior a 14 mm.

**Tabela 15** – Percentagem de amostra retida em cada peneiro.

| Amostra | Massa retida ( % m/m)  |     |      |      |      |        |
|---------|------------------------|-----|------|------|------|--------|
|         | Abertura da malha (mm) |     |      |      |      |        |
|         | 37,5                   | 25  | 14   | 5    | 2,36 | < 2,36 |
| P1      | 0,0                    | 0,0 | 15,0 | 29,3 | 26,3 | 28,5   |
| P2      | 0,0                    | 0,0 | 6,9  | 31,9 | 29,1 | 31,3   |

O material com granulometria entre 14 e 25 mm é composto essencialmente por vidro e por agregados de matéria orgânica cuja degradação foi mais lenta, como se pode observar na Figura 32. Estes agregados de matéria orgânica devem ser recirculados no processo de compostagem para que sejam sujeitos a degradação e se transformem em partículas de menores dimensões.



**Figura 32** – Agregados de matéria orgânica e vidro (à esquerda); Agregados de matéria orgânica na superfície das pilhas de compostagem (à direita).

Relativamente ao composto produzido no processo de compostagem doméstica, devido às características do material não foi possível efetuar a sua análise granulométrica. No entanto, através de uma observação atenta do mesmo facilmente se verifica que é constituído maioritariamente por agregados de matéria nunca inferiores a 40 mm.

### 3.2.3. MATÉRIA ORGÂNICA

De acordo com Insam, H. e Bertoldi, M. <sup>[34]</sup>, se o processo de compostagem for gerido corretamente, cerca de 50 % da matéria orgânica biodegradável é convertida em CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, sais minerais e energia. Da restante matéria orgânica cerca de 20 % é sujeita a transformações metabólicas complexas que originam substâncias húmicas e cerca de 30 % é parcialmente degradada através de processos aeróbios e anaeróbios, originando moléculas orgânicas mais simples. A perda de matéria orgânica biodegradável pode variar entre 30 a 60 % durante o processo de compostagem.

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados obtidos relativamente ao teor de matéria orgânica na mistura inicial de resíduos utilizada e no composto. Como se pode observar, não existe uma

grande diferença entre os compostos das pilhas 1 e 2, estando ambos os valores de acordo com os requisitos mínimos exigidos, ou seja, têm um teor de matéria orgânica superior a 30 % (em peso seco). De igual modo, o composto produzido nos compostores cumpre com o requisito mínimo exigido, embora apresente um valor consideravelmente superior (64,1 %). Relativamente ao desvio padrão, o mesmo é bastante elevado nas pilhas devido à heterogeneidade do material, que contém uma elevada quantidade de contaminantes não orgânicos (vidro, plásticos, etc.).

**Tabela 16** – Teor médio de matéria orgânica na mistura inicial de resíduos e nos compostos produzidos.

| Amostra                         | Teor médio de matéria orgânica (%) |
|---------------------------------|------------------------------------|
|                                 | ( $\bar{x} \pm s$ )                |
| Mistura inicial das pilhas      | 53,7 $\pm$ 6,7                     |
| Composto P1                     | 41,7 $\pm$ 4                       |
| Composto P2                     | 40,5 $\pm$ 6                       |
| Mistura inicial dos compostores | 65,5 $\pm$ 4,4                     |
| Composto C                      | 64,1 $\pm$ 1,4                     |

Comparando estes valores com os teores iniciais de matéria orgânica verifica-se que a perda de matéria orgânica ao longo do processo de compostagem não atingiu os valores previstos na literatura. No caso das P1 a redução foi de 22 %, nas P2 foi de 24 % e no processo em compostores a redução foi de apenas 2 %, valores que ficam muito aquém dos referidos 30 a 60 % <sup>[34]</sup>. Estes valores permitem concluir que o processo de compostagem não tinha ainda terminado.

### 3.2.4. METAIS PESADOS

O controlo dos metais pesados no composto é fundamental, uma vez que estes representam um grande perigo para a saúde e para o ambiente, quando em determinadas concentrações. A concentração de metais pesados no composto produzido depende da sua concentração na mistura inicial que, por sua vez, é função do tipo de resíduos que a constituem.

Na Tabela 17 encontram-se os resultados obtidos para a concentração de metais pesados nos 3 compostos produzidos.



**Tabela 17** – Concentração de metais pesados nas amostras dos 3 compostos produzidos.

| Elemento<br>(mg kg <sup>-1</sup> de matéria seca) | Composto |       |       |
|---------------------------------------------------|----------|-------|-------|
|                                                   | P1       | P2    | C     |
| Cádmio                                            | 0,17     | 0,17  | 0,13  |
| Chumbo                                            | 19,1     | 27,4  | 14,0  |
| Cobre                                             | 166,0    | 146,0 | 46,3  |
| Crômio                                            | 35,2     | 45,2  | 2,8   |
| Mercúrio                                          | 1,537    | 1,617 | 0,039 |
| Níquel                                            | 15,0     | 15,5  | 6,0   |
| Zinco                                             | 447,4    | 421,1 | 40,0  |

A concentração de metais pesados no composto, depende essencialmente da composição das matérias-primas utilizadas no processo de compostagem, da contaminação provocada pelos diferentes tipos de resíduos e, nomeadamente, maior lixiviação dos metais presentes quando existem elevadas concentrações de ácidos orgânicos produzidos durante o processo de compostagem <sup>[32, 68]</sup>. Como se pode observar, verifica-se uma diferença significativa entre os teores de metais pesados obtidos no processo P1 e P2 e nos compostores, o que se deve precisamente à origem dos resíduos. Os resíduos utilizados na compostagem doméstica provêm de uma recolha seletiva, como já foi referido, sendo exclusivamente orgânicos, pelo que os teores de metais que apresentam são unicamente derivados do teor de metais que as plantas que os originaram incorporaram do solo. No caso da compostagem em pilhas, os resíduos são urbanos e provêm de recolha indiferenciada, apresentando uma maior variabilidade na sua composição, tendo por isso um potencial de contaminação elevado. Comparando os valores obtidos para o processo 1 e 2 verifica-se que são similares, o que seria de esperar.

Tendo em conta a Tabela 3 do subcapítulo 1.3.7. da qual constam os valores máximos admissíveis para os teores de metais pesados num composto, previstos nas Especificações Técnicas <sup>[51]</sup>, e observando os resultados obtidos (Tabela 17), conclui-se que o composto produzido em compostores pode ser classificado como Classe I, uma vez que não ultrapassa nenhum dos teores máximos de metais pesados definidos para essa classe, podendo assim ser utilizado na agricultura. Os compostos P1 e P2, relativamente à Classe I, não cumprem com o teor máximo admissível em cobre, mercúrio e zinco. Para a Classe II, estes dois compostos excedem apenas o valor máximo admissível para o teor de mercúrio. Assim, ambos se enquadram na Classe IIA, podendo ser aplicados em culturas agrícolas arbóreas e arbustivas.

### 3.2.5. pH

Os valores de pH obtidos relativamente à matéria inicial e aos compostos produzidos encontram-se na Tabela 18.

**Tabela 18** – pH médio da mistura inicial e dos compostos produzidos.

| <b>Amostra</b>                  | <b>pH</b><br><b>(<math>\bar{x} \pm s</math>)</b> |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| Mistura inicial das pilhas      | 7,55 ± 0,2                                       |
| Composto P1                     | 8,07 ± 0,09                                      |
| Composto P2                     | 8,33 ± 0,2                                       |
| Mistura inicial dos compostores | 5,46 ± 0,8                                       |
| Composto C                      | 9,47 ± 0,2                                       |

Observando os resultados obtidos verifica-se uma diferença acentuada entre o pH do composto produzido na compostagem em pilhas e o pH do composto produzido na compostagem doméstica. Era expectável a existência de valores de pH distintos nesta fase, uma vez que os resíduos utilizados em cada processo tinham diferentes proveniências, pelo que apresentavam também um valor inicial de pH bastante diferente, utilizaram-se diferentes métodos de compostagem e os processos não foram iniciados em simultâneo. Embora o processo da compostagem doméstica se tenha iniciado praticamente 4 semanas antes da compostagem em pilhas, pelo valor de pH que o composto apresenta, e recordando a Figura 14 do subcapítulo 1.3.5.3.1. verifica-se que o processo ainda não atingiu a fase de maturação, o que nos indica que o processo de compostagem doméstica é mais lento do que o da compostagem em pilhas, e que o composto produzido através da sua aplicação ainda não está maturado.

Segundo as Especificações Técnicas o valor do pH do composto deverá situar-se entre 5,5 e 8,5<sup>[51]</sup>, pelo que se conclui que o composto produzido em ambas as pilhas cumpre com este requisito, ao contrário do composto produzido em compostor, que apresenta um valor de 9,47, claramente acima do estabelecido no referido documento.

### 3.2.6. CONDUTIVIDADE

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados obtidos para a condutividade dos compostos.

**Tabela 19** – Condutividade média dos compostos obtidos.

| <b>Amostra</b> | <b>Condutividade (mS/cm)</b><br><b>(<math>\bar{x} \pm s</math>)</b> |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|
| Composto P1    | 2,46 ± 0,2                                                          |
| Composto P2    | 2,36 ± 0,2                                                          |
| Composto C     | 2,00 ± 0,3                                                          |

Analisando os valores obtidos verifica-se que há uma certa concordância entre eles, sendo o valor mais elevado de 2,46 para a amostra P1 e o valor mais baixo de 2,00 para a amostra C. Em termos legais, para composto não é referida nenhuma especificação para este parâmetro. No entanto, compararam-se os valores obtidos com o valor máximo admissível de condutividade para águas de consumo, previsto no Decreto-Lei n.º 306/2007, que é 2500

$\mu\text{S/cm}$ , verificando-se que nenhum dos resultados obtidos é superior ao indicado, devendo por isso estar em conformidade para aplicação no solo e na agricultura, tendo em consideração que este limite é para consumo.

### 3.2.7. ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS – *ESCHERICHIA COLI*

Na Tabela 20 expressam-se os resultados obtidos nas análises microbiológicas dos compostos.

**Tabela 20** – Resultados das análises microbiológicas – *Escherichia Coli*.

| Amostra | $M_{\text{amostra}}$ (g) | Teor de humidade (%) | $M_{\text{seca}}$ (g) | Diluição  | UFC               |               | Teste 1 *     | Teste 2 | Teste 3 | Teste 4                    |
|---------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------|-------------------|---------------|---------------|---------|---------|----------------------------|
|         |                          |                      |                       |           | Colónias Amarelas | Colónias Rosa |               |         |         |                            |
| P1      | 10,0                     | 45,1                 | 5,5                   | $10^{-2}$ | 5000              | 3000          | 1455          | -       | -       | -                          |
| P2      | 10,0                     | 41,5                 | 5,9                   | $10^{-2}$ | 13000             | 33000         | 2203 / 5593,2 | +       | +       | + (para colónias amarelas) |
| C       | 10,2                     | 79,6                 | 1,9                   | $10^{-4}$ | 6500000           | 4300000       | 5684211       | -       | -       | -                          |

Teste 1 – *Lauryl Sulphate Broth* ; Teste 2 – *Fluorocult* ; Teste 3 – Fluorescência; Teste 4 – Índole

\* UFC/g

Como se pode observar na Tabela 20, e como foi já referido no capítulo da metodologia, para as análises microbiológicas utilizaram-se amostras de composto de cerca de 10 gramas. Para se averiguar a presença de *E. Coli* nas amostras, é necessário proceder-se à realização de 4 testes, sendo que para se considerar positiva a sua presença, a amostra deverá ter resultado positivo em todos os testes.

O primeiro, que se denomina por verificação da presença de *E. Coli* em meio presuntivo (*Lauryl Sulphate Broth*), consiste em verificar a presença de colónias bem como a sua cor, nas placas de Petri que foram incubadas com as amostras. Neste teste, verificou-se a presença de um total de 8 000 UFC na amostra P1, contabilizadas na diluição  $10^{-2}$ , sendo 5 000 UFC amarelas e 3 000 UFC rosa.

Na amostra P2 identificaram-se um total 46 000 UFC, igualmente na diluição  $10^{-2}$ , sendo 13 000 amarelas e 33 000 rosa. Por fim, na amostra C verificou-se a presença de 108 000 UFC, de entre as quais 65 000 amarelas e 43 000 rosa, contabilizadas na diluição  $10^{-4}$ . Assim, conclui-se que todas as amostras, neste teste, se revelaram positivas quanto à presença de *E. Coli*. Relativamente ao teste de verificação da presença de *E. Coli* em meio confirmativo (*Fluorocult*), apenas a amostra P2 se revelou positiva, tendo-se registado a mudança de cor roxa para amarela ao fim de 48 h de incubação.

Nas restantes amostras, o meio permaneceu roxo, o que significa que é negativa a presença de *E. Coli*. Na amostra P2 observou-se também a existência de gás no interior do tubo, o que reforça o carácter positivo do teste. Procedendo-se à realização do teste da fluorescência

verificou-se que apenas a amostra P2 se tornou fluorescente quando colocada na câmara UV, considerando-se uma vez mais positiva a presença de *E. Coli* nesta amostra.

Por fim, efetuou-se o teste da índole, que veio confirmar a inexistência de *E. Coli* nas amostras P1 e C e a sua presença na amostra P2, mas apenas para as colónias amarelas, sendo que as rosa correspondem a outros coliformes que não a *E. Coli*. Assim, conclui-se que a amostra P2 contém 2203 UFC/g.

Nas Especificações Técnicas <sup>(51)</sup> é referido que um composto deve ter um valor igual ou inferior a 1000 UFC/g para se poder considerar higienizado. Assim, conclui-se que o composto P2 não está higienizado, tal como se havia já suspeitado aquando da análise das temperaturas, no subcapítulo 3.1.1.

Em suma, apresenta-se a Tabela 21 que permite uma visão sintética dos resultados obtidos através das análises efetuadas aos 3 compostos produzidos, com comparação da Tabela 3 do subcapítulo 1.3.7. relativamente à qualidade do material, de acordo com as Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto <sup>[51]</sup>.

**Tabela 21** – Resumo dos resultados obtidos nos parâmetros analisados e comparação com os valores especificados nas Especificações Técnicas.

| Parâmetro                       | Composto                |                         |                       |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
|                                 | P1                      | P2                      | C                     |
| Cádmio (mg kg <sup>-1</sup> )   | 0,17                    | 0,17                    | 0,13                  |
| Chumbo (mg kg <sup>-1</sup> )   | 19,1                    | 27,4                    | 14,0                  |
| Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )    | 166,0                   | 146,0                   | 46,3                  |
| Crómio (mg kg <sup>-1</sup> )   | 35,2                    | 45,2                    | 2,8                   |
| Mercúrio (mg kg <sup>-1</sup> ) | 1,537                   | 1,617                   | 0,039                 |
| Níquel (mg kg <sup>-1</sup> )   | 15,0                    | 15,5                    | 6,0                   |
| Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )    | 447,4                   | 421,1                   | 40,0                  |
| Escherichia Coli (NMP/g)        | Ausente                 | 2203                    | Ausente               |
| Teor de Humidade (%)            | 45,1                    | 41,5                    | 79,6                  |
| Granulometria (< 25 mm)         | 100 % do material passa | 100 % do material passa | Nenhum material passa |
| Matéria orgânica                | 41,7                    | 40,5                    | 64,1                  |
| pH                              | 8,07                    | 8,33                    | 9,47                  |

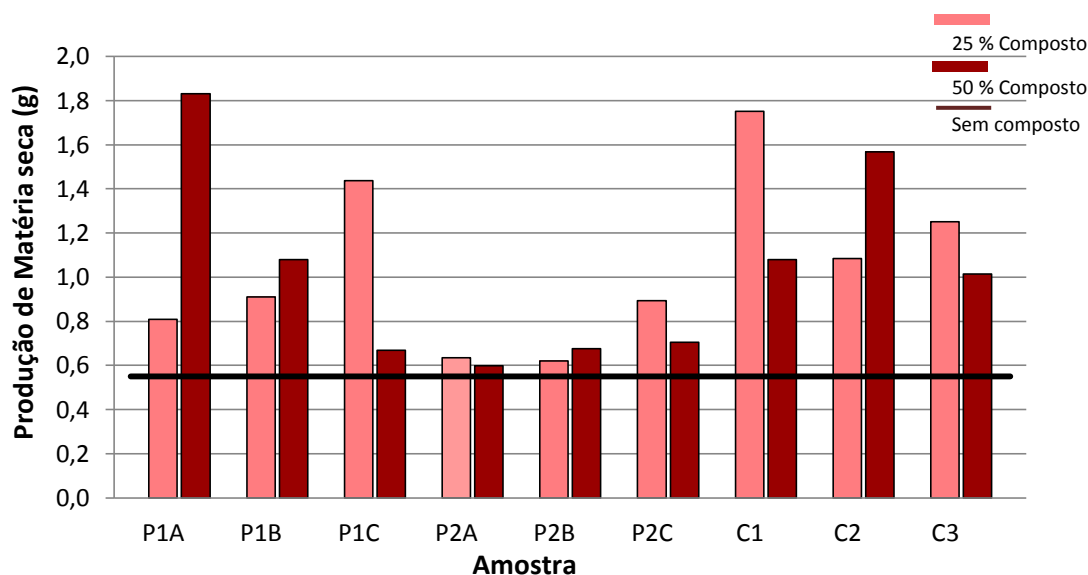
Legenda: Classe I, Classe II, Classe IIA, Nenhuma classe

Conclui-se desta forma que, em todos os casos, embora cumpram com a maioria dos limites previstos nas Especificações Técnicas para serem considerados compostos de Classe I, estes compostos não se inserem em nenhuma das classes previstas no referido documento, devido

ao não cumprimento de parâmetros como o teor de humidade e, no caso do P2 a presença de *E. Coli* e, no caso do C, o elevado valor de pH e granulometria.

### 3.2.8. FITOTOXICIDADE

Os resultados das análises de fitotoxicidade efetuados encontram-se na Figura 33, e são dados pela comparação da produção de matéria seca acumulada numa planta teste, quando instalada em substratos com doses crescentes de composto.



**Figura 33** – Resultados do teste de fitotoxicidade, avaliado através da comparação da produção de matéria seca (g) da cultura de azevém instalado em substratos com doses crescentes de composto.

No que se refere à fitotoxicidade, conclui-se, por observação da Figura 33, que nenhum dos compostos obtidos é fitotóxico, uma vez que a produção de biomassa tanto na modalidade de 25 % como 50 % foi superior a 90 % da verificada na modalidade de referência, em todos os casos. De acordo com os resultados do teste de fitotoxicidade pode-se afirmar que estes compostos não são prejudiciais ao crescimento das plantas. Quanto maior for a produção de matéria seca, melhor é o composto. De um modo geral, analisando a Figura 33 verifica-se que a aplicação dos compostos é vantajosa para ambas as proporções de composto/turfa (25/75 e 50/50) em todos os casos.

Tal como era expectável, o composto produzido nos compostores apresenta, de um modo geral, uma produção de matéria seca mais elevada, o que se deve ao facto de apresentar também um teor de matéria orgânica mais elevado e, consequentemente, maior disponibilidade de azoto mineral para as plantas. Da mesma forma, o composto produzido no processo 1, quando comparado com o do processo 2, apresenta uma produção de matéria seca mais elevada, o que poderá ser explicado pelo maior teor de matéria orgânica.

O padrão de resultados da produção da matéria seca nas modalidades de compostagem estudadas pode ser explicado pela diferença na disponibilidade de azoto não orgânico. A menor temperatura durante o processo de compostagem 1, quando comparado com as temperaturas do processo 2, origina uma menor volatilização do azoto, sobretudo na forma amoniacal. O efeito da temperatura e o seu efeito na disponibilidade de azoto mineral poderá também explicar a maior produção de matéria seca nos compostores.

No Anexo VI encontram-se algumas imagens das plantas antes de serem cortadas.

## **4 ANÁLISE CRÍTICA**

Dando resposta ao principal objetivo desta dissertação, e na perspectiva da empresa Ambisousa, tendo em consideração os resultados obtidos, apresenta-se uma análise crítica dos estudos realizados.

No caso da compostagem doméstica, os resultados obtidos indicam que é viável utilizar o processo como forma de desviar os RUB de aterro e para a produção de um composto com qualidade, classificado com Classe I, que poderá assim ser utilizado na agricultura. No entanto, através do estudo realizado em compostores concluiu-se que, para que se atinja o objetivo deste projeto de compostagem doméstica, é necessário proceder-se à otimização de alguns parâmetros.

Em primeiro lugar, verificou-se que, pelo facto de os resíduos serem adicionados ao compostor mediante a sua produção, e dada a capacidade de 300 L dos compostores utilizados, durante cerca de 5 a 6 meses (no caso de uma habitação) não se consegue atingir a sua capacidade, o que limita o desenvolvimento do processo de compostagem na medida em que não se atingem as temperaturas necessárias ao mesmo durante este período devido à enorme quantidade de calor que se dissipa. Esta metodologia de adição de resíduos faz também com que o material no interior dos compostores se encontre em diferentes fases de decomposição para o mesmo período de tempo, o que torna o processo muito mais demorado do que poderia ser. Neste sentido, considera-se que os compostores deveriam ser dotados de uma separação que permitisse que o composto já pronto fosse retirado, e o material ainda em decomposição permanecesse no seu interior. Em segundo lugar, os compostores utilizados carecem de mais aberturas, que permitam maior ventilação, para que o arejamento do material seja mais eficaz e permita uma maior evaporação de água, por forma a se reduzir o teor de humidade no composto, que se verificou ser um dos entraves à sua qualificação em Classe I. Quanto à granulometria e pH do material, considera-se que os mesmos podem ser otimizados prolongando a duração do processo de compostagem.

No que se refere ao estudo de compostagem centralizada realizado, tendo em conta os resultados obtidos, tudo indica que é possível e tecnicamente viável através de um processo em pilhas revolvidas, produzir um composto de qualidade, classificado como Classe II A de acordo com as Especificações Técnicas, a partir de resíduos orgânicos provenientes de tratamento mecânico. Este composto poderá ser comercializado para aplicação em culturas arbóreas e arbustivas.

No entanto, existem algumas considerações a ter em conta para se atingir o objetivo deste processo. No que se refere às temperaturas, tendo em conta que não atingiram valores suficientemente elevados durante o tempo necessário para ocorrer a higienização do composto, considera-se que as mesmas poderão ser aumentadas com um aumento da escala do processo, pois o tamanho utilizado nas pilhas de compostagem neste estudo poderá ter propiciado uma dissipação de calor maior. No entanto, este parâmetro deverá ser monitorizado continuamente, por forma a permitir um acompanhamento eficaz do processo.

Quanto ao revolvimento das pilhas, considera-se que o mesmo deverá ser efetuado de acordo com a variação da temperatura, ou seja, com as necessidades do processo. Relativamente ao teor de humidade, considera-se que ao longo do processo não haverá necessidade de se proceder ao seu ajuste, face aos resultados obtidos neste estudo e considerando a utilização de um estruturante. No composto, com um prolongamento do tempo de compostagem e garantido um período de maturação adequado é possível otimizar esse parâmetro. A adição de um estruturante em quantidade e com características adequadas deverá também ser equacionada, como forma de aumentar a porosidade da mistura de materiais na pilha e facilitar o arejamento.



## **5 CONCLUSÕES**

A produção de resíduos, consequência das atividades humanas, é uma problemática de âmbito mundial. A implementação de um sistema de gestão adequado, que inclua as operações de recolha, transporte, valorização e eliminação dos resíduos, bem como o planeamento e a fiscalização destas operações, pode minimizar os potenciais efeitos dos resíduos no ambiente e na saúde pública. O modelo de gestão de resíduos português, e de acordo com os requisitos legais Europeus, assenta numa hierarquia de prioridades, na qual os resíduos são encarados como recursos, sendo a primeira opção de gestão a prevenção. A eliminação definitiva de resíduos surge como última opção de gestão, aplicável apenas quando nenhuma das anteriores é técnica e economicamente viável.

Em Portugal Continental, em 2012, foram produzidas 4,782 milhões de toneladas de resíduos, das quais 53,2 % correspondiam a Resíduos Urbanos Biodegradáveis (RUB). Destes, 59,1 % foram encaminhados para aterro e apenas 34,9 % foram alvo de valorização.

A Ambisousa, Empresa Intermunicipal de Tratamento e Gestão de Resíduos Urbanos, que trata e gere os resíduos urbanos da população do Vale do Sousa, estimada em 337 000 habitantes, obteve em 2012, uma estatística semelhante à nacional, sendo a fração maioritária dos RU rececionados os RUB; no entanto, destes, cerca de 96 % foram depositados em aterro. Face a estes valores, e tendo em conta as metas estipuladas para a redução da deposição em aterro destes resíduos, a atingir até 2020 de acordo com o Decreto-Lei n.º 183/2009 de 17 de julho, a empresa Ambisousa tem vindo a explorar medidas que promovam a valorização destes resíduos, desviando-os do aterro, evitando os problemas relacionados com a sua deposição, e valorizando-os.

Este trabalho surgiu então neste contexto, tendo como principal objetivo avaliar a viabilidade técnica da aplicação de processos de compostagem centralizada e doméstica por esta empresa.

A compostagem é um processo de biodegradação de matéria orgânica por ação de microrganismos, mediante condições controladas, por forma a garantir a produção de um composto homogéneo, estável e maturado, que pode ser rico em nutrientes, sendo isento de patogénicos e podendo ser aplicado no solo como fertilizante ou corretivo orgânico.

Para dar cumprimento ao objetivo estabelecido, desenvolveram-se dois estudos experimentais, sendo um representativo de compostagem centralizada, no qual se utilizou o sistema não-reator de pilhas revolvidas, e outro representativo de compostagem doméstica, utilizando os compostores domésticos distribuídos pela empresa.

No estudo da compostagem centralizada, utilizaram-se resíduos orgânicos provenientes de uma estação de tratamento mecânico-biológico, por serem a matéria-prima que mais se assemelharia à que no futuro resultará do tratamento mecânico dos resíduos provenientes de

recolha indiferenciada que a Ambisousa pretende implementar. Como estruturante do processo utilizou-se serrim de madeira.

O processo de compostagem centralizada teve uma duração de 66 dias, e o objetivo principal foi estudar de que forma o revolvimento influenciava o processo. Para tal, simularam-se dois processos: (1) revolvimento efetuado de 2 em 2 semanas; e, (2) revolvimento efetuado conforme variação da temperatura. Para cada processo foram realizadas 3 réplicas, sendo que todas as pilhas construídas eram homogêneas relativamente ao tipo e quantidade de materiais que as constituíam, e também quanto às dimensões. As pilhas estiveram cobertas com tela de PEAD ao longo de todo o processo.

A monitorização da temperatura ao longo do processo permitiu aferir que, quando o revolvimento é feito consoante a variação da temperatura e, por isso, consoante as necessidades da pilha, consegue-se obter temperaturas mais elevadas durante mais tempo e, de um modo geral, a variação da temperatura apresenta um comportamento claramente descendente e regular ao longo do tempo, como se verificou no processo 2. As temperaturas mantiveram-se acima dos 45 °C pelo menos durante 14 dias, tendo apresentado, ao longo do tempo, variações de temperatura entre os 30 e os 56 °C. No caso do processo 1, a variação da temperatura foi irregular, apresentando um máximo de 56 °C cerca de 40 dias após o início do processo. Neste caso, verificaram-se temperaturas mais baixas do que no processo 2 ao longo do tempo, embora as mesmas tivessem variado dentro da mesma gama.

No processo 2, conseguiu distinguir-se de forma clara as diferentes fases do processo, uma vez que, como já foi referido, a variação da temperatura foi regular. No processo 1, já não foi tão fácil fazer-se essa distinção, uma vez que as temperaturas oscilavam entre temperaturas mesófilas e termófilas de forma mais irregular.

A monitorização da temperatura foi feita em vários pontos das pilhas, tendo-se aferido que, de um modo geral, tal como é referido na literatura, as temperaturas foram superiores no centro das pilhas do que nas periferias, chegando a atingir-se diferenças de 12 °C dentro de uma mesma pilha. Aferiu-se também que, tal como esperado pelo tipo de processo, a temperatura ambiente influencia as temperaturas do processo.

No estudo da compostagem doméstica, utilizaram-se resíduos domésticos aplicáveis ao processo, e aplicaram-se as tradicionais condições para a sua realização, sendo os resíduos adicionados ao longo do tempo. O processo teve a duração de 82 dias, ao longo dos quais não se atingiram temperaturas superiores a 32 °C. Os baixos valores de temperatura observados, entre os 12 e os 32 °C, justificam-se pela pequena massa em compostagem que se conseguiu reunir no compostor, que origina uma elevada dissipação de calor. Outras razões que justificam estes valores são, por exemplo, o tipo de compostores utilizados, que dificultam a otimização da humidade e do arejamento, a esterilidade da mistura inicial de resíduos ou a existência de uma população reduzida de microrganismos que levará mais tempo a decompor os materiais.

Neste caso, verificou-se também que a influência dos revolvimentos no processo não foi a esperada, pois o aumento de temperatura após um revolvimento nunca foi superior a 5 ou 6

°C, sendo que alguns aumentos coincidiram com o aumento da temperatura ambiente, que influenciou as temperaturas do processo ao longo de todo o tempo.

Em nenhum dos processos de compostagem estudados se atingiram temperaturas de higienização durante tempo suficiente para garantir a higienização dos compostos produzidos.

Os compostos obtidos nos 3 processos estudados, durante os períodos de degradação já referidos, foram submetidos a análises, tendo-se feito posteriormente uma comparação com os limites atuais de referência.

Das análises efetuadas pode concluir-se que nenhum dos compostos produzidos se encontra devidamente estabilizado e maturado, não cumprindo por isso com alguns parâmetros de controlo de qualidade de compostos, pelo que não se inserem em nenhuma classe de qualidade prevista nas “Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto”. No que se refere ao composto produzido no processo 1, o mesmo não cumpre com o teor de humidade máximo permitido (40 %), apresentando um valor de 45,1 %. O composto produzido no processo 2, excede também o valor do teor de humidade máximo permitido em 1,5 %, o que o exclui também de qualquer classe. Além disso, este composto apresenta uma concentração de *E. Coli* bastante superior ao permitido, o que não era expectável. Relativamente ao composto produzido nos compostores, o mesmo apresenta também um teor de humidade superior, de 79,6 %, não cumpre com o parâmetro do pH, apresentando um valor de 9,47, estando previsto no documento já referido que o pH do composto deverá estar entre 5,5 e 8,5, e apresenta também uma granulometria bastante superior ao especificado.

Da análise da fitotoxicidade aos compostos concluiu-se que nenhum é fitotóxico, tanto na modalidade de 25 % como na de 50 %, de acordo com *Gutezeichen Kompost* RAL-GZ 251, sendo que o composto produzido nos compostores foi o que apresentou, no geral, maior produção de matéria seca, seguido do composto do processo 1.

De um modo geral concluiu-se que o composto 1 poderia ser classificado como Classe IIA, caso o teor de humidade fosse inferior, o que se conseguiria facilmente proporcionando ao mesmo um adequado período de maturação. De igual modo o composto 2, poderia também ser classificado em Classe IIA, com a agravante de ter que se higienizar o mesmo para eliminação da *E. Coli*. Quanto ao composto proveniente da compostagem doméstica, o mesmo seria classificado em Classe I, podendo ser aplicado na agricultura, caso se baixasse o seu teor de humidade, o que se conseguiria, tal como referido, submetendo o mesmo a um período correto de maturação e proporcionando alguma evaporação. Um período de maturação seria suficiente para promover também um decréscimo do pH e da granulometria, essencial para este composto ser considerado Classe I.



## **6 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS**

O trabalho desenvolvido abre o caminho para futuras investigações, em particular no que se refere a processos de compostagem aplicados a resíduos orgânicos provenientes de tratamento mecânico de resíduos urbanos recolhidos indiferenciadamente (compostagem centralizada) ou a resíduos orgânicos provenientes de recolha seletiva (compostagem doméstica).

Neste sentido, seria interessante desenvolver estudos adicionais, nomeadamente na formulação de misturas de resíduos que permitam otimizar o processo de compostagem centralizada, tornando o processo mais abrangente e desviando assim um maior fluxo de resíduos de aterro. Seria igualmente produtivo desenvolver trabalhos em maior escala, em termos dimensionais e temporais, por forma a torná-los mais representativos dos processos que se pretendem implementar, em particular permitindo temperaturas de higienização e uma fase de maturação adequada para o composto ter qualidade para ser comercializado.

No âmbito da compostagem doméstica, seria técnica e economicamente viável para a empresa proceder a estudos de otimização dos compostores já adquiridos e distribuídos aos municípios, por forma a otimizar a compostagem doméstica, e tornar este projeto mais atrativo e eficaz na produção de um composto que os cidadãos possam utilizar, com segurança e qualidade, para usufruto próprio.



## **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] **Agência Portuguesa do Ambiente 2014.** Gestão de Resíduos. *www.apambiente.pt*. [Online] [Acedido em: 4 de Abril de 2014].
- [2] **Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (2007).** *PERSU II – Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007 – 2016*.
- [3] **Agência Portuguesa do Ambiente (2011).** *Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2011-2020*.
- [4] **Levy, J. Q. e Cabeças, A. J. (2006).** *Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos*. Associação das Empresas Portuguesas para o Setor do Ambiente.
- [5] **Instituto Nacional de Estatística (2010).** *O Setor dos resíduos em Portugal 2004-2009*. Lisboa.
- [6] **Agência Portuguesa do Ambiente (2014).** Gestão de Resíduos Urbanos. *www.apambiente.pt*. [Online] [Acedido em: 15 e 19 de Abril de 2014].
- [7] **LIPOR – Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto (2014).** Princípios da Sustentabilidade. *www.lipor.pt*. [Online] [Acedido em: 7 de Abril de 2014].
- [8] **Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de setembro, Diário da República, 1ª Série, n.º 171, p. 6526-6545.**
- [9] **Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de junho, Diário da República, 1ª Série, n.º 116, p. 3251-3300.**
- [10] **Agência Portuguesa do Ambiente (2014).** *Relatório Anual de Resíduos Urbanos 2012 – Parte I*.
- [11] **Agência Portuguesa do Ambiente (2014).** Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos 2011. *www.apambiente.pt*. [Online].
- [12] **Maystre, L.Y. and Duflon, V. (1994).** *Déchets Urbains: nature et caractérisation*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, Suisse.
- [13] **Agência Portuguesa do Ambiente (2014).** *Relatório de Estado do Ambiente 2013*.
- [14] **Agência Portuguesa do Ambiente (2014).** *Plano de Prevenção de Resíduos Urbanos 2011*.
- [15] **Energia e desenvolvimento Sustentável na Região Norte.** *Valorização de Resíduos Orgânicos*.
- [16] **Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto, Diário da República, 1ª Série, n.º 153, p. 5170-5198.**

- [17] **Silva, F. (2010).** *A Estratégia Nacional para os Resíduos Biodegradáveis*, in Seminário “Recolha Seletiva de Resíduos Orgânicos com Sacos Biodegradáveis”. Agência Portuguesa do Ambiente.
- [18] **Comissão Europeia (2008).** *Livro Verde sobre a gestão dos bio-resíduos na União Europeia*. Bruxelas.
- [19] **Brito, L.M. (2014).** *Manual de Compostagem*, in Escola Superior Agrária de Ponte de Lima - Instituto Superior de Viana do Castelo. [www.ci.esapl.pt/mbrito](http://www.ci.esapl.pt/mbrito) [Online] [Acedido em: 30 de Junho de 2014]
- [20] **Epstein, E. (2011).** *Industrial Composting - Environmental Engineering and Facilities Management*. Ed.: Taylor and Francis.
- [21] **Rynk, R., Kamp, M., Willson, G., Singley, M., Richard, T., Kolega, J., Gouin, F., Laliberty, L., Kay, D., Murphy, D., Hoiitink, H. and Brinton, W. (1992).** *On-Farming Compost Handbook*. Ed.: Northeast Regional Agricultural Engineering Service.
- [22] **Kreith, F. and G. Tchobanoglous (2002).** *Handbook of solid waste management*. 2ª ed.: McGraw-Hill.
- [23] **Haug, R.T. (1993).** *The practical handbook of compost engineering*. Ed.: Lewis Publishers.
- [24] **Cunha Queda, A.C.F. (1999).** *Dinâmica do azoto durante a compostagem de materiais biológicos putrescíveis*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Agro-Industrial, Instituto Superior de Agronomia, UTL.
- [25] **Shammas, N. K. and Wang, L. K. (2008).** *Biosolids Composting*, in *Handbook of Environmental Engineering - Biological Treatment Processes*. Ed.: Humana Press. pp. 645-687.
- [26] **Anónimo (2005).** *Manure Composting Manual*. Alberta Agriculture, Food and Rural Development. Canadá.
- [27] **Merkel (1981).** *Composting*, in *Managing livestock wastes*. Ed.: AVI. pp. 306-322.
- [28] **Vallini, G. (1995).** *Il Compostaggio*, in *La protezione dell’ambiente in Italia*. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Società Chimica Italiana e Consorzio Interuniversitario Chimica per l’Ate. pp. 83-134. Bologna.
- [29] **Piedade, M. e Aguiar, P. (2010).** *Opções de Gestão de Resíduos Urbanos*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR, I. P.). Lisboa.
- [30] **Almeida Duarte, E. e Cunha-Queda, A.C. (2005).** *Estratégias de obtenção de compostos de qualidade com potencial para valorização agrícola*. Escola Superior de Biotecnologia, Universidade Católica Portuguesa. Porto.
- [31] **Krider, J. N., Chapman, D., United States Environmental Protection Agency, United States Department of Agriculture (USDA), and Natural Resources Conservation Service (NRCS) (2010).** Chapter 2 Composting, in *National Engineering Handbook - Part 637 Environmental Engineering*. Washington, DC: US Dept. of Agriculture.



- [32] **Epstein, E. (1997).** *The Science of Composting*. Ed.: CRC Press LLC . ISBN 1--56676-478-5.
- [33] **Brito, L.M. (2006).** *Compostagem para a Agricultura Biológica*, in Manual de Agricultura Biológica - Terras de Bouro. Ed.: Isabel Mourão; José Pedro Araújo e Miguel Brito (Escola Superior Agrária de Ponte de Lima - ESAPL/IPVC). pp. 119-137.
- [34] **Insam, H. and Bertoldi, M. (2007).** *Micobiology of the Composting Process*, in Compost Science and Technology. Ed.: Elsevier. pp. 26-48.
- [35] **Mustin, M. (1987).** *Le Compost Gestion de la Matière Organique*. Ed.:François Dubusc.
- [36] **Batista, J.G.F. and Batista, E.R.B. (2007).** *Compostagem: Utilização de compostos em horticultura*. Universidade dos Açores - CITA-A.
- [37] **Russo, M. (2003).** *Tratamento de Resíduos Sólidos*, in Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.
- [38] **Piedade, M. e Aguiar, P. (2010).** *Opções de Gestão de Resíduos Urbanos*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR, I.P.). Lisboa.
- [39] **Diaz, L.F. and Savage, G.M. (2007).** *Factors that Affect the Process*, in Compost Science and Technology. Ed.: Elsevier. pp. 49-65.
- [40] **Bidlingmaier, W. and Müsken, J. (2007).** *Odor emissions from composting plants*, in Compost Science and Technology. Ed.: Elsevier. pp. 215-324.
- [41] **British Columbia Ministry of Agriculture and Food (1998).** *B.C. Agricultural Composting Handbook*. 2nd ed.: British Columbia.
- [42] **Gonçalves, M. (1999).** *Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos. Sua valorização para fins agrícolas pelo método de compostagem*. Lisboa.
- [43] **United States Environmental Protection Agency - Office of Solid Waste and Emergency Response (1994).** *Composting Yard Trimmings and Municipal Solid Waste*.
- [44] **Fernandes, P. (1999).** *Estudo Comparativo e Avaliação de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos*, in Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- [45] **Sousa, D. (2008).** *Aplicação do Processo de Compostagem na Estabilização de Dejetos de Coelho*. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.
- [46] **Mendes, A. (2009).** *Estudo Técnico-Económico de uma Unidade de Co-Compostagem de lamas de ETAR*. Porto.
- [47] **Fernandes, M. (2012).** *Avaliação do processo a implementar numa central de compostagem: formulação de misturas de resíduos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [48] **Santos, L. (2001).** *Resíduos com interesse agrícola. Evolução de parâmetros da sua compostagem*. Ed.: I.P.d. Bragança.

- [49] **European Commission - Directorate-General Environment (2001).** *Working Document - Biological Treatment of Biowaste.*
- [50] **Gonçalves, M. e Batista, M. (2001).** *Proposta de regulamentação sobre qualidade de composto para utilização na agricultura.* Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva/Instituto Nacional de Investigação Agrária e das Pescas.
- [51] **Anónimo (2008).** *Especificações Técnicas sobre Qualidade e Utilizações do Composto.* A.P.d. Ambiente. Lisboa.
- [52] **Cristina Cunha-Queda.** *INTERREG III B SUDOE DEFOR SO2/1.3/F64 - Développement Forestier - Instituto Européen de la Forêt Cultivée. France.*
- [53] **Portugal (2006).** *2007/64/CE: Decisão da Comissão, de 15 de Dezembro de 2006.*
- [54] **Portugal (2011).** *2011/740/UE: Decisão da Comissão, de 14 de Novembro de 2011.*
- [55] **Sá, E. (2009).** *Validação de um modelo de compostagem usando um compostor doméstico.* Departamento de ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.
- [56] **Cerveira, A. (2008).** *Compostagem Doméstica Aplicada a uma escola EB 2,3.* Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro.
- [57] **Ambisousa (2014).** *www.ambisousa.pt.* [Online] [Acedido em: 3 de Junho de 2014.]
- [58] **Ambisousa (2012).** *Relatório e contas do ano de 2012.*
- [59] **Ambisousa (2011).** *Relatório e contas do ano de 2011.*
- [60] **Ambisousa (2010).** *Relatório e contas do ano de 2010.*
- [61] **Resinorte (2014).** *www.resinorte.pt.* [Online]
- [62] **Plastidom (2014).** *www.plastidom.net.* [Online]
- [63] **Lopes, S. (2009).** *Da Recolha Seletiva de RUB ao Nutrimais - a Experiência da LIPOR.* Centro de Congressos do Estoril.
- [64] **Wilkinson, K. .** *On-Farm Composting of Dead Stock.* Future Farming Systems Research Division, Department of Primary Industries, Victoria - Australia.
- [65] **RAL-Gütezeichen Kompost, Gütesicherung RAL-GZ 251, (1992).** RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung. Bonn.
- [66] **Simujide, H., Aorigele, C., Wang, C., Lina, M. and Manda, B. (2013).** *Microbial activities during mesophilic composting of manure and effect of calcium cyanamide addition,* in *International Biodeterioration and Bidegradation.* Ed.: Elsevier.
- [67] **Qian, X.; Shen, G.; Wang, Z.; Guo, C.; Liu, Y. and Lei, Z. (2013).** *Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system.* Ed.: Elsevier.

**[68] Tittarelli, F., G. Petruzzelli, B. Pezzarossa, M. Civilini, A. Benedetti and P. Sequi (2007).** *Quality and agronomic use of compost*, in *Compost Science and Technology*. Ed.: Elsevier. p. 119-157.

**[69]** CIENTIC. *www.cientic.com*. [Online] [Acedido em: 21 de Junho de 2014.]

**[70]** Resulima. *www.resulima.pt*. [Online] [Acedido em: 22 de Junho de 2014.]



## 8 ANEXOS

### Anexo I Microrganismos intervenientes no processo de compostagem

A variedade de microrganismos intervenientes no processo de compostagem permite que este seja um processo contínuo apesar das constantes mudanças nas suas condições operacionais (temperatura, humidade, oxigénio, nutrientes, entre outras). Na compostagem, há uma constante sucessão de microrganismos que estão ativos em diferentes estágios do processo, dependendo, essencialmente, da disponibilidade de nutrientes e dos níveis de temperatura <sup>[31, 43]</sup>. Os microrganismos intervenientes no processo de compostagem são capazes de degradar uma grande variedade de compostos, desde aminoácidos e compostos açucarados simples, a complexas proteínas e hidratos de carbono <sup>[31]</sup>.

Nas fases iniciais da compostagem, a decomposição da matéria-prima é bastante rápida devido à elevada quantidade de material degradável que existe. Nestas fases, são consumidos os materiais mais facilmente biodegradáveis, tais como aqueles que têm baixo peso molecular e estruturas químicas simples. As bactérias são os microrganismos mais abundantes nestas fases, pois devido à sua simplicidade funcional só são capazes de degradar compostos mais simples. À medida que a disponibilidade de materiais facilmente degradáveis diminui, começam a ser decompostos os materiais mais complexos, como aqueles que têm um elevado peso molecular e estruturas químicas complexas e, que por isso mesmo, não conseguem passar diretamente para as células, necessitando da ação de enzimas extracelulares para serem degradados. Para tal, são necessários microrganismos mais complexos, como os fungos, que produzam as tais enzimas que hidrolisam os materiais complexos transformando-os em fragmentos mais pequenos, degradáveis por microrganismos mais simples <sup>[31, 43]</sup>.

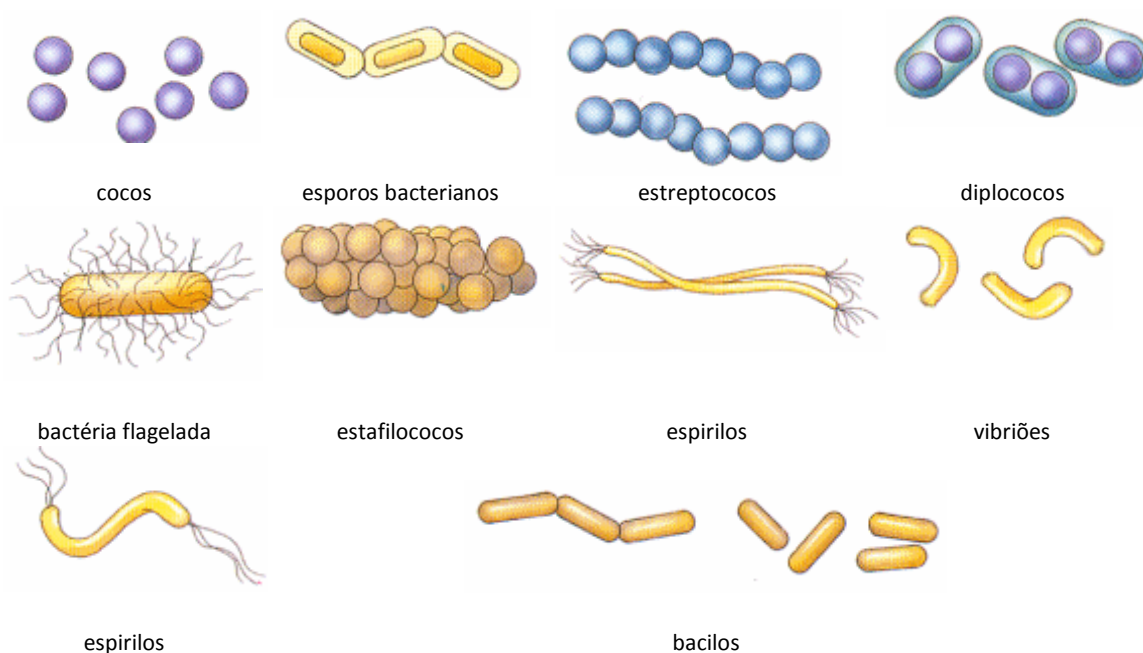
Os microrganismos intervenientes na compostagem podem ser agrupados em 3 classes: bactérias, fungos e actinomicetes. Estes, podem ser ainda classificados em aeróbios (necessitam de oxigénio), anaeróbios (não utilizam oxigénio) ou anaeróbios facultativos (utilizam oxigénio se este estiver disponível mas também funcionam na sua ausência), consoante a necessidade de oxigénio, ou em psicrófilos (< 25 °C), mesófilos (25 – 45 °C) ou termófilos (45 – 70 °C), de acordo com a gama de temperaturas nas quais melhor operam <sup>[31, 43]</sup>.

Existem outros organismos que também desempenham um papel muito importante na compostagem, nomeadamente na diminuição do tamanho dos materiais a compostar (aumento a área superficial a compostar) e na movimentação dos materiais ao longo da pilha. São eles: os rotíferos, os ácaros, os colêmbolos, os besouros, as minhocas, entre outros <sup>[43]</sup>.

## Bactérias

As bactérias (Figura I-1) são microrganismos simples e pequenos que, como já foi referido, abundam nos estágios iniciais do processo da compostagem. Este grupo de microrganismos apresenta uma vasta variedade, o que lhes permite sobreviverem em condições operacionais muito distintas. Uma vez que degradam muito rapidamente os compostos mais simples, são por vezes denominados de decompositores rápidos. No entanto, são também capazes de digerir os produtos da decomposição fúngica e, por vezes, até mesmo celulose <sup>[31]</sup>.

Em termos operacionais, as bactérias são pouco tolerantes a teores de humidade baixos. Por vezes, perante essas condições desfavoráveis, alguns tipos de bactérias formam endósporos que lhes permitem sobreviver nessas condições. Quando as condições se tornam favoráveis os endósporos germinam e as bactérias tornam-se ativas novamente. Este mecanismo permite a continuação do processo de compostagem, mesmo em fases operacionais menos favoráveis à presença destes microrganismos.



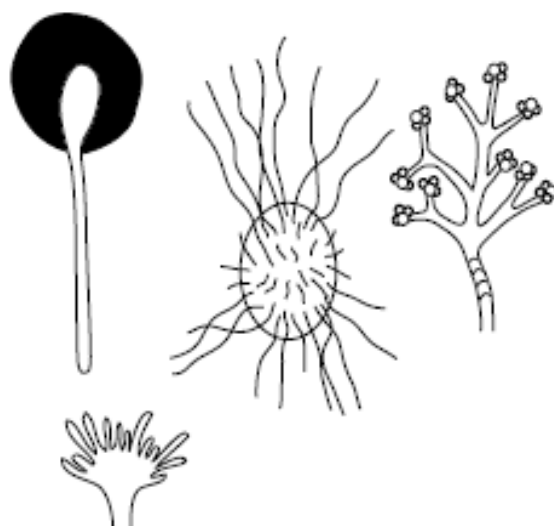
**Figura I-1 – Bactérias** (Adaptado de CienTIC <sup>[69]</sup>)

## Fungos

No processo de compostagem, os fungos (Figura I-2) aparecem habitualmente em fases mais avançadas, pois são capazes de degradar os materiais mais complexos, que as bactérias não degradam, tais como proteínas, celulose, lenhina e pectina. Estes microrganismos têm tendência a formar filamentos, pelo que são de maiores dimensões do que as bactérias. Os fungos adaptam-se facilmente a meios com teores de humidade e pH baixos, mas a maioria, sendo aeróbios, são menos tolerantes a meios com baixa concentração de oxigénio do que as

bactérias. No que se refere à temperatura do meio, estes microrganismos não toleram temperaturas superiores a 60 °C<sup>[31, 43]</sup>.

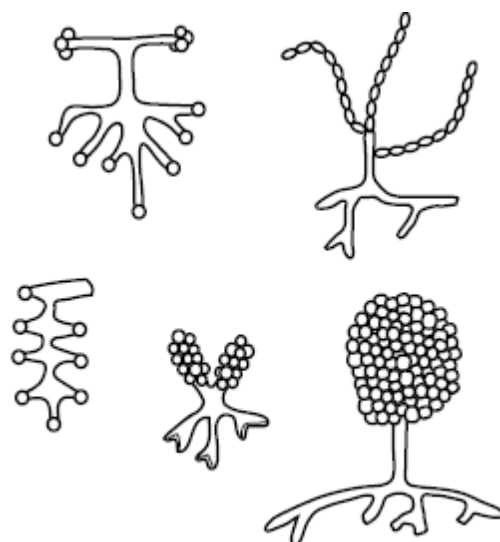
Sendo os fungos os principais responsáveis pela degradação dos materiais mais resistentes, facilmente se compreende que temperaturas excessivas são prejudiciais em termos de degradação para o processo de compostagem. Se, por um lado, altas temperaturas provocam a morte dos microrganismos patogénicos, o que é desejável, por outro lado, podem provocar a morte de microrganismos essenciais ao processo tornando-o incompleto<sup>[31]</sup>.



**Figura I-2 – Fungos**<sup>[31]</sup>.

## Actinomicetes

Os actinomicetes (Figura I-3) representam a terceira maior classe de microrganismos interveniente no processo de compostagem. Estes microrganismos são semelhantes às bactérias no que respeita à sua estrutura e tamanho e, por outro lado, são também semelhantes aos fungos na medida em que formam filamentos e degradam uma grande variedade de materiais, tais como amidos, açúcares, celuloses, proteínas, lenhina, aminoácidos, entre outros. Para tal, estes microrganismos produzem enzimas extracelulares, que por vezes degradam também outras bactérias. Em termos de condições do meio, estes microrganismos adaptam-se bem a ambientes com baixo teor de humidade e pH pouco ácido<sup>[31]</sup>.



**Figura I-3** – Actinomicetes <sup>[31]</sup>.

Na Tabela I-1 apresenta-se uma lista extensiva de microrganismos que foram identificados no processo de compostagem, desde as bactérias, fungos e actinomicetes, aos protozoários e algas.



**Tabela I-1** – Microrganismos identificados no processo de compostagem <sup>[20]</sup>.

| <b>BACTÉRIAS</b>                  |                                   |                                  |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <i>Aerobacter</i>                 | <i>Pseudomonad</i> sp.            | <i>Chondrococcus virescens</i>   |
| <i>Bacillus megatherium</i>       | <i>Flavobacterium</i> sp.         | <i>M. fulvus</i>                 |
| <i>B. stearothermophilus</i>      | <i>Micrococcus</i> sp.            | <i>Thibacillus thiooxidans</i>   |
| <i>B. cereus</i>                  | <i>Sarcina</i> sp.                | <i>T. denitrificans</i>          |
| <i>B. Mycoides</i>                | <i>Cellumonas folia</i>           | <i>Proteus</i> sp.               |
| <b>FUNGOS</b>                     |                                   |                                  |
| <i>Rhizopus nigricans</i>         | <i>Stysanus stemonitis</i>        | <i>Trichosporon cutaneum</i>     |
| <i>Rhizoctonia</i> sp.            | <i>Glibotrys</i>                  | <i>Verticillium</i> sp.          |
| <i>Geotrichum candidum</i>        | <i>Humicola insolens</i>          | <i>Synecephalastrum</i> sp.      |
| <i>Mucor pusillus</i>             | <i>Humicola griseus</i>           | <i>Pichia</i> sp.                |
| <i>Penicillium digitatum</i>      | <i>Absidis orchidis</i>           | <i>Cylindrocara</i> sp.          |
| <i>Mucor racemosus</i>            | <i>Rhizopus arrhizus</i>          | <i>Chaetomium</i>                |
| <i>Torulopsis</i> sp.             | <i>Candida</i>                    | <i>Lipomyces</i> sp.             |
| <i>Aspergillus flavus</i>         | <i>Cladosporium herbarum</i>      | <i>Sporotrichium thermophile</i> |
| <i>Absidia</i>                    | <i>Rhodotorula rubra</i>          | <i>Fusarium moniliforme</i>      |
| <i>Saccharomyces</i> sp.          | <i>Aspergillus tamarii</i>        | <i>Trichoderma koningi</i>       |
| <i>Pulluloria</i> sp.             | <i>Zygorhynchus vuilleminii</i>   | <i>Talaromyces duponti</i>       |
| <i>Pythium</i> sp.                | <i>Hanisenula</i> sp.             |                                  |
| <b>ACTINOMICETES</b>              |                                   |                                  |
| <i>Nocardia brasiliensis</i>      | <i>Actinoplanes</i> sp.           | <i>S. rectus</i>                 |
| <i>Thermomonospora viridis</i>    | <i>Themopolyspor polyspora</i>    | <i>S. thermofuscus</i>           |
| <i>T. curvata</i>                 | <i>Pseudonocardia</i>             | <i>S. thermovulgaris</i>         |
| <i>Micromonospora parva</i>       | <i>Streptomyces violaceoruber</i> | <i>Thermomonospora fusca</i>     |
| <i>M. vulgaris</i>                | <i>S. thermoviolaceus</i>         | <i>T. glaucus</i>                |
| <i>Thermoactinomyces vulgaris</i> |                                   |                                  |
| <b>PROTOZOÁRIOS</b>               |                                   |                                  |
| <i>Chilomonas (paramecium)</i>    | <i>Lycogala epidendrum</i>        | <i>Cercomonas (crassicauda)</i>  |
| <i>Cyathomonas (truncata)</i>     |                                   |                                  |
| <b>ALGAS</b>                      |                                   |                                  |
| <i>Hormidium (nitens)</i>         | <i>Dactylococcus (bicandatus)</i> | <i>Porphyridium (cruentum)</i>   |
| <i>Vaucheria (terrestris)</i>     | <i>Chlorococcum humicola</i>      | <i>Kentrosphaera</i> sp.         |
| <i>Euglena mutabilis</i>          | <i>Microcoleus vaginatus</i>      | <i>Protococcus vulgaris</i>      |



## Anexo II Tecnologias da Compostagem

### 1. Sistemas não-reator

#### 1.1. Leiras revolvidas (*windrows*)

A compostagem com leiras revolvidas consiste em dispor a matéria-prima em leiras longas e estreitas que são revolvidas com regularidade <sup>[21]</sup>. As dimensões das leiras variam de acordo com o clima, o equipamento disponível e o tipo de material utilizado <sup>[31]</sup>. Krider, J. & Chapman, D. <sup>[31]</sup> referem que as dimensões típicas destas leiras são entre 1,8 e 3,7 metros de altura, 6 metros de largura e o comprimento pode estender-se por centenas de metros. Por sua vez, Shamas, N.K. & Wang, L. K. <sup>[25]</sup> referem que tipicamente estas leiras têm uma largura de 4,5 metros e uma altura de 1 a 2 metros.

O formato que as leiras podem ter depende muito do tipo de clima a que estarão expostas e também do material que será utilizado para efetuar o seu revolvimento. Em climas maioritariamente chuvosos, as leiras requerem um formato que permita o escoamento da água. Pelo contrário, em climas secos as leiras deverão ter um formato que lhes permita reter água por forma a manter o teor de humidade da leira <sup>[31]</sup>. Habitualmente, as leiras têm secção trapezoidal ou triangular <sup>[25]</sup>. Leiras demasiado estreitas promovem a perda excessiva de calor, o que faz com que não se atinjam temperaturas suficientemente elevadas para evaporar humidade e eliminar os microrganismos patogénicos <sup>[21]</sup>. Leiras demasiado largas têm tendência a originar zonas anaeróbias no interior libertando odores aquando do revolvimento <sup>[21, 31]</sup>.

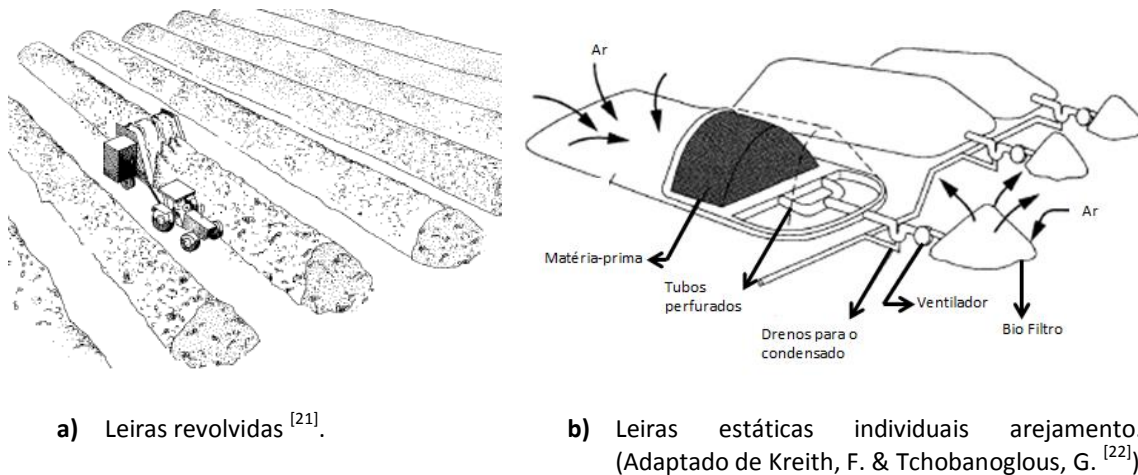
Nas leiras revolvidas, o oxigénio é fornecido aos microrganismos através de arejamento passivo, promovido pelos revolvimentos e por convecção natural. O revolvimento é feito alagando a leira e construindo-a novamente <sup>[22]</sup>. A frequência do arejamento depende da temperatura da leira, da consistência do material, da disponibilidade de equipamento, da época do ano e do tempo. Habitualmente, no início do processo o revolvimento é feito com mais frequência (diariamente) devido à atividade microbiana ser bastante intensa e, consequentemente, originar temperaturas mais elevadas. À medida que o processo progride fazer o revolvimento uma vez por semana é suficiente <sup>[21, 31]</sup>. No geral, um revolvimento mais frequente tende a manter os níveis de oxigénio, o teor de humidade e a temperatura em níveis apropriados, fazendo com que o processo de compostagem seja mais rápido <sup>[31, 43]</sup>.

Quando o odor emanado das leiras é muito intenso, deve ser equacionada a colocação de uma camada de geotêxtil, material orgânico ou de solo. Estes materiais também ajudam a contornar os efeitos negativos que determinadas condições meteorológicas provocam <sup>[26, 31]</sup>.

Após a fase ativa do processo de compostagem, o volume das leiras diminui devido à decomposição dos materiais. Assim, duas leiras com igual grau de maturação podem ser combinadas, libertando espaço para a construção de novas leiras <sup>[41]</sup>.

Segundo Rink, R. et al. <sup>[21]</sup> com esta tecnologia de compostagem a fase ativa do processo dura entre 3 e 9 semanas dependendo do tipo de substrato e da frequência do revolvimento. Se se

tiver como objetivo concluir o processo em 3 semanas será necessário fazer um revolvimento bi-diário durante a primeira semana e de 5 em 5 dias daí em diante <sup>[21]</sup>.



**Figura II-1 – Sistemas não-reator.**

Na Figura II-1 a) encontra-se um desenho típico deste tipo de sistemas.

## 1.2. Leiras estáticas com arejamento

As leiras estáticas com arejamento são como que uma variação do método das leiras revolvidas. A principal diferença é a forma como o oxigénio é fornecido aos microrganismos, como se pode observar na Figura II-1 b). Enquanto que nas leiras revolvidas o arejamento é feito por convecção natural e através do revolvimento, nas leiras estáticas são utilizados sistemas mecânicos de ventilação – sistema de sucção ou sistema de insuflação <sup>[31]</sup>. O sistema de sucção suga o ar da leira através de tubos perfurados que culminam numa leira de composto já estabilizado que atua como um filtro de odores bastante eficaz. No sistema de insuflação o ar é injetado na base da leira, atravessando-a e libertando-se através da sua superfície. Assim, neste último tipo de sistema é mais difícil fazer-se um tratamento dos odores <sup>[20, 43]</sup>. A principal desvantagem dos sistemas de sucção face aos outros é o facto de não conseguirem inserir uma quantidade muito elevada de ar no interior da leira, em parte devido à presença do filtro de odores que introduz perdas de pressão no sistema <sup>[31]</sup>. Por outro lado, a sua principal vantagem face ao sistema de pressão positiva é o facto de ser muito eficaz na redução/eliminação de odores <sup>[20]</sup>. Nos sistemas que funcionam com pressão positiva os odores poderão ser minimizados alterando o caudal de ar, otimizando as capacidades do fluxo de ar, através de dispersão ou aumentando o isolamento da cobertura <sup>[41]</sup>.

Os ventiladores podem funcionar de forma contínua, por intervalos previamente definidos ou de acordo com a temperatura na leira de compostagem <sup>[31]</sup>.

Outra diferença relativamente ao método das leiras revolvidas é a forma como as leiras são construídas. Neste caso, as leiras são construídas sob uma grelha de tubos perfurados, como se pode observar na Figura II-1 b). Para facilitar o arejamento e evitar obturações, sobre essa grelha e antes da colocação do substrato coloca-se habitualmente uma camada de agente estruturante, como aparas de madeira ou composto. No topo da leira poderá colocar-se uma camada de composto já maturado ou de um agente estruturante para prevenir a perda excessiva de humidade, reduzir a perda excessiva de calor, prevenir o aparecimento de moscas e filtrar os gases com potencial odorífero gerados na leira <sup>[21, 22, 41, 43]</sup>. Segundo Kreith, F. & Tchobanoglous, G. <sup>[22]</sup> no final do processo de construção a leira deverá ter uma largura de cerca de 3,9 metros, uma altura de 2,4 metros e um comprimento indeterminado. Na opinião de Rink, R. <sup>[21]</sup>, embora o comprimento possa ser bastante maior do que as restantes dimensões, há um valor máximo (cerca de 21 metros) a partir do qual a quantidade de ar que chega à extremidade do tubo oposta ao ventilador é extremamente pequena. No *Agricultural Composting Handbook* <sup>[41]</sup>, é referido que o tamanho ótimo para a leira está condicionado pelo tipo de material a compostar, pelo caudal de ar e pelo tipo de equipamento utilizado na construção e manutenção da leira.

Por forma a minimizar a área necessária para o processo de compostagem utilizando este método existe uma variação do mesmo que consiste em agregar as leiras, denominando-se por leiras alargadas. Neste sistema a matéria-prima vai sendo acrescentada paralelamente à leira já formada <sup>[20, 21]</sup>. As leiras alargadas ocupam cerca de 50% menos de área relativamente às individuais <sup>[25]</sup>.

De acordo com o *Composting Yard Trimmings and Municipal Solid Waste* <sup>[43]</sup> é necessário um período de 3 a 6 meses para se obter um composto devidamente higienizado e estabilizado através desta tecnologia. Rink, R. <sup>[21]</sup> refere que quando a leira é construída devidamente, o fornecimento de ar é suficiente e a sua distribuição é uniforme, o período ativo do processo dura entre 3 a 5 semanas.

No geral, a principal desvantagem desta tecnologia é a dificuldade em conseguir uma difusão do ar que seja eficiente em todos os pontos da pilha, em particular quando o substrato é constituído por partículas de grandes dimensões, tem um teor de humidade muito elevado ou tendência para compactar <sup>[26, 41]</sup>. Assim, este método é mais indicado para substratos granulares com partículas de pequena dimensão e substratos pouco húmidos <sup>[43]</sup>.

## 2. Sistemas reator (*In-Vessel Systems*)

Os sistemas reator são sistemas com maior *input* tecnológico nos quais o processo de compostagem decorre em compartimentos fechados. A introdução de ar é feita normalmente com recurso ao arejamento forçado ou revolvimento mecânico, por forma a acelerar o processo de decomposição. A principal vantagem deste tipo de sistemas é o facto de promoverem um processo de compostagem mais rápido e eficiente, e conseguirem uma redução significativa da quantidade de microrganismos patogénicos (por se conseguirem geralmente temperaturas de higienização durante o período necessário) o que permite a produção de um produto final mais seguro e valioso. A necessidade de uma área menor

quando comparados com os sistemas de leiras é também uma grande vantagem. Por outro lado, estes sistemas apresentam como desvantagem a necessidade de um grande investimento e elevados custos de manutenção <sup>[21, 26, 31, 37]</sup>. Nestes sistemas todos os parâmetros críticos são controlados mecanicamente e, na maioria dos sistemas mais recentes, todo o processo é já automatizado <sup>[43]</sup>.

Kreith, F. & Tchobanoglous, G. <sup>[22]</sup> referem que, salvo raras exceções, os sistemas “em reator” da atualidade utilizam uma combinação de compostagem em reator com compostagem em pilhas revolvidas, sendo a primeira utilizada para a fase ativa do processo e a segunda para a maturação.

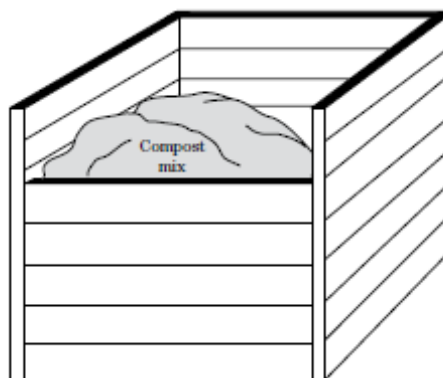
Existe uma certa variedade de sistemas reator que combinam diferentes tipos de compartimentos, dispositivos de arejamento e mecanismos de revolvimento <sup>[37]</sup>.

### **2.1. Caixas de Compostagem (*Bin Composting*)**

O método das caixas de compostagem é o método mais simples dos sistemas reator. Neste método, os materiais a compostar são contidos por paredes e, por vezes, por uma cobertura, usualmente construídas com ripas de madeira ou em cimento, tal como se pode observar na Figura II-2. Este método permite o empilhamento de uma maior quantidade de material e, por isso, permitem uma melhor ocupação do espaço. Eliminar os problemas derivados das condições meteorológicas, conter os odores emanados e promover um melhor controlo da temperatura são vantagens que este método habitualmente oferece <sup>[21, 31]</sup>.

De um modo geral, este método opera de forma semelhante ao das pilhas estáticas com arejamento podendo ser este forçado, na base da caixa, ou manual. Nos casos em que se utilizam vários compostores, periodicamente o revolvimento pode-se fazer transferindo-se o material de uma caixa para outra adjacente <sup>[21, 31]</sup>.

Uma desvantagem deste processo é que para caixas demasiado altas o grau de compactação e a resistência à passagem do ar são bastante elevados.



**Figura II-2** – Caixa de compostagem <sup>[31]</sup>.

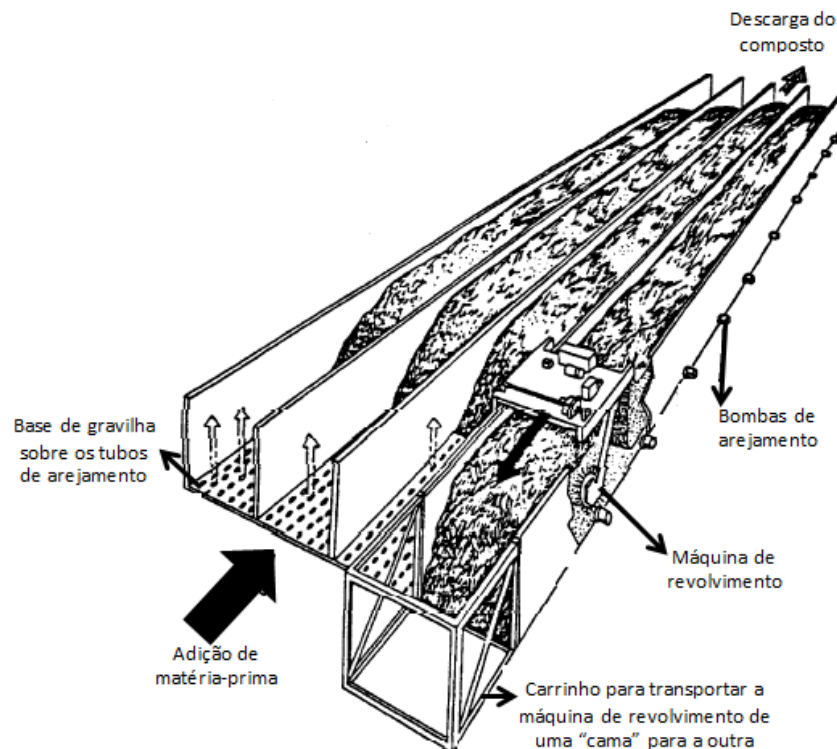
## 2.2. “Camas” agitadas (*Agitated Beds*) ou Sistema Reator Horizontal (*Horizontal In-Vessel System*)

Neste tipo de tecnologia, as chamadas “camas” agitadas são construídas em longos canais paralelos com cobertura cuja base pode ser de cimento ou então pode conter um material poroso como a gravilha para promover uma melhor circulação de ar na base da mistura. Este sistema combina o arejamento controlado com o revolvimento periódico. Os longos canais estreitos encontram-se separados por paredes ao longo de todo o seu comprimento, nas quais a máquina que efetua o revolvimento é colocada. Normalmente, à medida que a máquina se move ao longo de cada canal (separadamente) o composto vai sendo revolvido e é atirado para trás da mesma a uma certa distância em direção ao fim da “cama”. As máquinas que efetuam o revolvimento agitam o material, quebram as partículas de maiores dimensões e mantêm a porosidade da mistura, o que são vantagens para o processo. Estas máquinas funcionam de forma automática, dispensando a necessidade de um operador, podendo ser controladas à distância <sup>[21, 31, 43]</sup>. Na Figura II-3 encontra-se esquematizado este tipo de sistema.

Em muitos destes sistemas, por baixo da base de gravilha e/ou tela é colocada uma matriz de tubos perfurados para promoverem o arejamento do material, como se pode observar na Figura II-3. Entre revolvimentos, o arejamento é feito com bombas de ventilação que inserem o ar no material a compostar e promovem o seu arrefecimento. Uma vez que o material ao longo da “cama” se encontra em diferentes fases de decomposição, exigem diferentes quantidades de ar. Assim, numa mesma “cama” são habitualmente colocadas diferentes bombas de ventilação, que fornecem diferentes quantidades de ar consoante o local da “cama” onde se encontram, sendo controladas individualmente por um temporizador ou um sensor de temperatura <sup>[21, 31]</sup>.

Segundo Rink, R. et al. <sup>[21]</sup> a largura das “camas” pode variar entre 1,8 e 6 m e a sua profundidade entre os 0,9 e os 3 m. O comprimento da “cama” e a frequência de revolvimento determinam a duração do processo.

Para sistemas comerciais é sugerido um período de compostagem de 2 a 4 semanas utilizando este sistema. No entanto, podem ser necessários longos períodos de maturação (1 a 2 meses) <sup>[21, 31]</sup>.



**Figura II-3** – Representação esquemática do sistema de “camas” agitadas (Adaptado de Rink, R. et al. <sup>[21]</sup>).

### 2.3. Silos

Os silos são um método de compostagem também incluído nos sistemas reator. Neste método, tal como o nome indica, utilizam-se silos para fazer a compostagem. A matéria-prima misturada é diariamente introduzida no silo a partir do seu topo, enquanto o material já decomposto é removido através da base do silo, sendo encaminhado para outro silo onde ocorrerá a sua maturação, como se pode observar na Figura II-4. Devido ao facto de o silo ser vertical, há um empilhamento da matéria-prima, o que provoca compactação do material e, consequentemente, interferências na temperatura e no caudal de ar. Assim, é aconselhável fazer uma mistura eficiente da matéria-prima antes de a introduzir no silo <sup>[21, 31]</sup>.

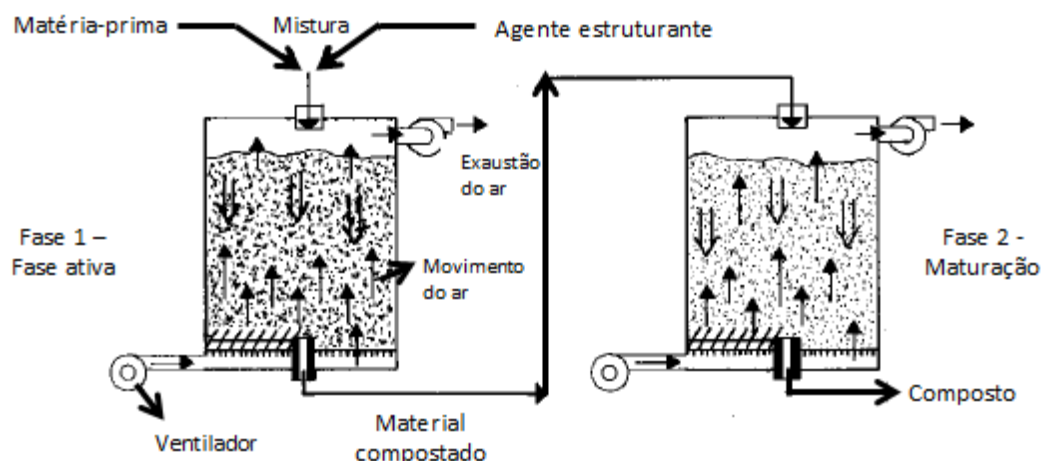
Relativamente ao arejamento, o mesmo é provido a partir da base do silo. O ar é forçado a atravessar o material em compostagem e é coletado no topo do silo para ser encaminhado para um sistema de tratamento de odores <sup>[21, 31]</sup>.

Uma grande dificuldade deste sistema é conseguir manter um equilíbrio entre o teor de humidade e o ar entre as diferentes camadas de material dentro do tanque. Outro problema prende-se com a formação de condensado na parte superior do silo, o que descontrola o teor de humidade e a temperatura nos níveis superiores, local onde esses parâmetros são mais difíceis de controlar <sup>[43]</sup>.

Tipicamente, com a aplicação desta tecnologia o tempo de compostagem é de cerca de 14 dias, tempo estimado para que 1/14 do volume do silo tenha sido removido e repostos



diariamente <sup>[21, 22, 31]</sup>. O tempo de retenção estimado para a maturação do composto é de 20 dias <sup>[22]</sup>.



**Figura II-4** – Representação esquemática do sistema de silos (Adaptado de Rink, R. et al. <sup>[21]</sup>).

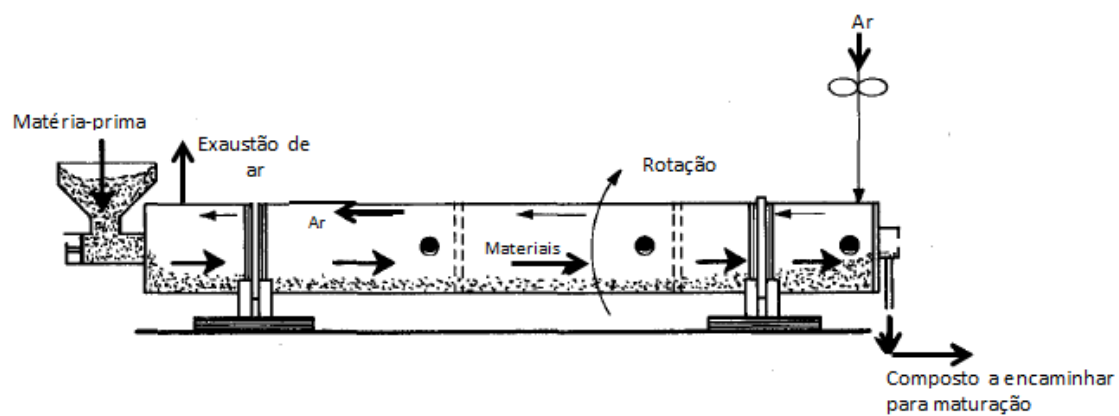
## 2.4. Tambor rotativo

Um dos primeiros sistemas reator implementado foi o sistema de tambor rotativo. Este sistema utiliza um cilindro rotativo horizontal para fazer a mistura, o arejamento e o transporte do material ao longo do processo, como se pode observar no esquema da Figura II-5 <sup>[21, 22]</sup>. Habitualmente os cilindros têm um diâmetro de 2,7 metros e uma velocidade de rotação de 2 rpm. O tempo de retenção é estimado em 1 a 6 dias, sendo determinado pela velocidade de rotação e pela inclinação do cilindro <sup>[22]</sup>.

No tambor rotativo, a decomposição dos materiais começa imediatamente e são decompostos os materiais mais facilmente degradáveis. Após passar pelo tambor rotativo, o material não se encontra ainda completamente estabilizado. Assim, é necessário colocá-lo em pilhas de pós compostagem e maturação por forma a produzir um composto devidamente estável, durante um período de 1 a 3 meses <sup>[22, 43]</sup>.

O ar entra no tambor pela abertura final ou por outras aberturas que o mesmo possa ter e é incorporado nos materiais, pelo que, de um modo geral, circula dentro do tambor no sentido contrário ao do material a compostar, como é visível na Figura II-5. Assim, quando o material se aproxima do terminal do tambor é arrefecido pelo ar exterior. Por outro lado, o material que entra é posto em contacto com material quente, motivando assim o crescimento de microrganismos para efetuarem a sua decomposição <sup>[31]</sup>.

Este sistema implica um elevado custo de capital, operacional e de manutenção <sup>[22]</sup>.



**Figura II-5** – Representação esquemática do sistema de tambor rotativo (Adaptado de Rink, R. et al. <sup>[21]</sup>).

## **Anexo III Características físicas, químicas e biológicas do composto**

O composto pode ser definido como sendo o produto final, higienizado e rico em compostos húmicos, resultante do processo de compostagem, que pode ser manuseado e armazenado sem qualquer problema, tendo um efeito benéfico quando aplicado às plantas <sup>[23]</sup>.

A qualidade de um composto é determinada pelas suas características físicas, químicas e biológicas.

Das características físicas interessa em particular a cor, a textura, o tamanho das partículas e a ausência de contaminantes não compostáveis. De entre as características químicas importa destacar o teor em matéria orgânica, o teor de humidade, o pH, os metais, teor em nutrientes, sais e compostos orgânicos. A estabilidade, maturidade, a presença ou não de patogénicos e a capacidade de supressão de doença são os parâmetros biológicos que mais importam <sup>[20, 31]</sup>. Estas características são particularmente importantes quando o destino do composto é a sua comercialização <sup>[33]</sup>.

### **A. Características físicas**

No contexto das características físicas, importa referir que o tamanho das partículas depende do fim a que se destina o composto, sendo que partículas com diâmetro inferior a 13 mm dotam o composto para a aplicação destinada à correção dos solos. A textura do material deve ser semelhante à do solo e a sua cor deverá situar-se entre o castanho-escuro e o preto. A ausência de contaminantes não compostáveis no composto final é importantíssima, independentemente do fim a que o mesmo se destina <sup>[31]</sup>.

### **B. Características químicas**

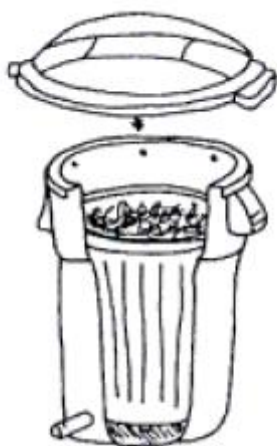
As características químicas do composto são importantes para determinar o seu valor como fertilizante ou corretor de solos, o seu potencial tóxico e a facilidade com que é incorporado no solo. O teor de matéria orgânica no composto é determinado em laboratório, embora o valor obtido não corresponda exatamente à quantidade de matéria orgânica que irá contribuir para o solo, devido às diferentes formas em que a mesma se pode encontrar. No caso de o composto ter como finalidade a correção de solos quanto ao teor de matéria orgânica, este parâmetro toma particular importância. A humidade que o composto deve apresentar deverá situar-se entre 30 a 50 % por forma a ser facilmente incorporado no solo. Relativamente ao pH, deverá situar-se entre 6 e 8 para que não prejudique qualidade do solo para plantações. A quantidade de nutrientes presente num composto pode ser facilmente determinada em laboratório. O amoníaco é a principal forma de azoto logo após a fase de maturação, pelo que é um nutriente que merece particular interesse. Em grandes quantidades, o amoníaco pode ser prejudicial para a horticultura. Aos poucos o amoníaco vai dando lugar aos nitratos. A quantidade de azoto no composto determina em parte a sua aptidão para ser aplicado a

determinados tipos de culturas. Outros nutrientes importantes para o crescimento das plantas são o fósforo, o potássio, o cálcio e o magnésio. É fundamental conhecerem-se as percentagens destes nutrientes presentes no composto bem como o seu rácio em relação uns aos outros, pois o mesmo afeta a absorção de nutrientes por parte das plantas, bem como o seu crescimento. Quando o composto é utilizado em plantações que se destinam ao consumo humano, é muito importante conhecer o teor de metais. Nos compostos derivados de lamas de ETAR e de resíduos municipais este parâmetro é uma grande preocupação. A presença de sais no composto pode ser prejudicial para as plantas uma vez que reduz a absorção de água e desenvolve condições que são tóxicas para as plantas <sup>[31]</sup>.

### **C. Características biológicas**

Os parâmetros biológicos são também fundamentais, pois um composto que verifique todas as condições físicas e químicas referidas não pode ser considerado um composto com qualidade se não estiver estabilizado. Um composto não está estabilizado se a atividade microbiana no seu seio for ainda elevada. A não estabilidade do composto inibirá o crescimento das plantas pois os microrganismos ainda ativos competirão com as plantas na aquisição de nutrientes <sup>[31]</sup>. É importante que o composto tenha capacidade de suprimir determinadas doenças. A matéria-prima utilizada, o tipo de compostagem e as condições em que decorre a fase de maturação determinam o grau de supressão à doença que o composto pode ter. O grau de maturação do composto também afeta as qualidades supressivas do mesmo: compostos imaturos promovem os agentes patogénicos propiciando o aumento de doenças e, por sua vez, composto demasiado estabilizados não servem de suporte aos microrganismos que se pensa serem os agentes responsáveis pelo controlo do desenvolvimento de doenças <sup>[31, 46]</sup>.

## Anexo IV Tipos de Compostores



Compostor Duplo <sup>[55]</sup>



Compostor de madeira <sup>[55]</sup>



Compostor *Milko* <sup>[55]</sup>



Compostor Eco <sup>[55]</sup>



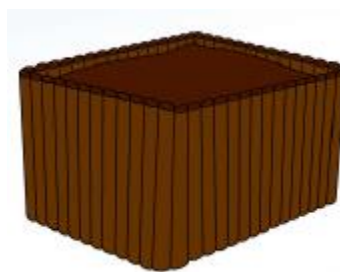
Compostor *Rapid* <sup>[55]</sup>



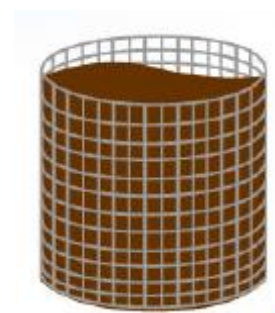
Compostor *Thermo king* <sup>[55]</sup>



Compostor Rotativo <sup>[55]</sup>



Cerca <sup>[70]</sup>



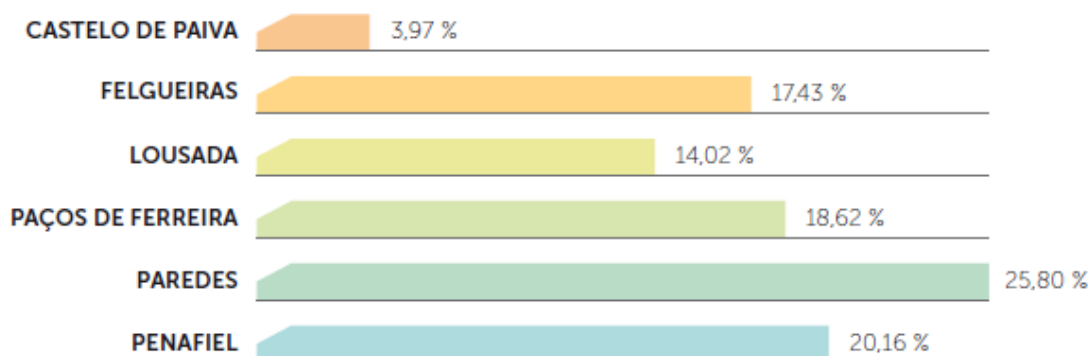
Compostor de rede <sup>[70]</sup>



## Anexo V Dados estatísticos da Ambisousa

**Tabela V-1** – Resíduos depositados nos aterros do Vale do Sousa, em 2012 <sup>[58]</sup>.

| MÊS           | CASTELO DE PAIVA | FELGUEIRAS       | LOUSADA          | PAÇOS DE FERREIRA | PAREDES          | PENAFIEL         | REFUGOS       | TOTAIS MENSAIS    |
|---------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|-------------------|
| janeiro       | 374,18           | 1619,72          | 1282,02          | 1706,22           | 2.509,36         | 1.956,84         | 94,98         | <b>9.543,32</b>   |
| fevereiro     | 328,14           | 1465,22          | 1129,28          | 1.521,52          | 2.183,50         | 1.705,14         | 46,72         | <b>8.379,52</b>   |
| março         | 384,66           | 1.783,14         | 1.431,54         | 1.897,60          | 2.622,32         | 2.055,68         | 43,78         | <b>10.218,72</b>  |
| abril         | 410,98           | 1.732,90         | 1.388,42         | 1.828,72          | 2.527,44         | 1.979,20         | 70,80         | <b>9.938,46</b>   |
| maio          | 409,00           | 1.769,62         | 1.437,78         | 1.881,36          | 2.645,24         | 2.128,00         | 57,48         | <b>10.328,48</b>  |
| junho         | 400,86           | 1.730,64         | 1.476,14         | 1.968,42          | 2.679,20         | 2.018,84         | 46,48         | <b>10.320,58</b>  |
| julho         | 447,10           | 1.812,78         | 1.502,54         | 1.986,74          | 2.657,36         | 2.098,70         | 24,34         | <b>10.529,56</b>  |
| agosto        | 472,04           | 1.979,36         | 1.654,38         | 2.108,54          | 2.829,62         | 2.246,94         | 29,30         | <b>11.320,18</b>  |
| setembro      | 369,78           | 1.740,04         | 1.367,64         | 1.823,06          | 2.492,48         | 1.928,34         | 44,52         | <b>9.765,86</b>   |
| outubro       | 404,04           | 1.775,88         | 1.402,40         | 1.910,12          | 2.610,96         | 2.011,38         | 84,76         | <b>10.199,54</b>  |
| novembro      | 352,66           | 1.594,54         | 1.241,80         | 1.686,78          | 2.378,08         | 1.855,98         | 69,50         | <b>9.179,34</b>   |
| dezembro      | 358,22           | 1.678,96         | 1.317,50         | 1.770,38          | 2.476,10         | 1.931,96         | 85,24         | <b>9.618,36</b>   |
| <b>Totais</b> | <b>4.711,66</b>  | <b>20.682,80</b> | <b>16.631,44</b> | <b>22.089,46</b>  | <b>30.611,66</b> | <b>23.917,00</b> | <b>697,90</b> | <b>119.341,92</b> |



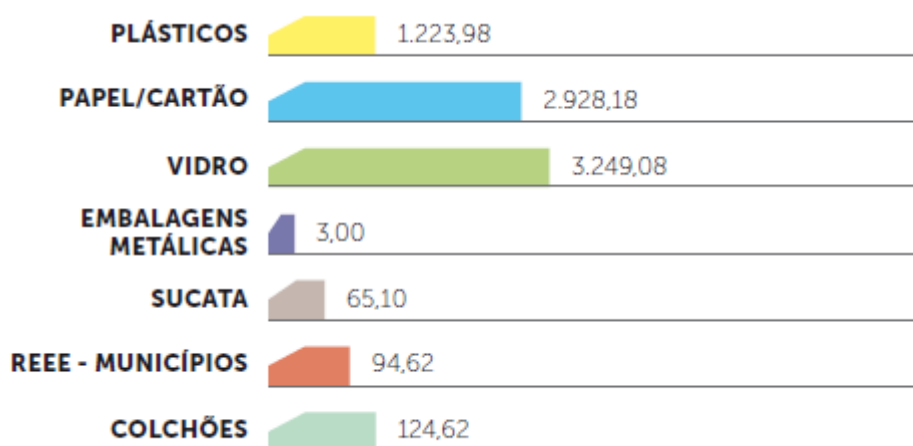
**Figura V-1** – Distribuição percentual da quantidade de resíduos urbanos por cada município, em 2012 <sup>[58]</sup>.

**Tabela V-2** – Capitação média diária (kg/hab/dia), nos municípios do Vale do Sousa, em 2012 <sup>[58]</sup>.

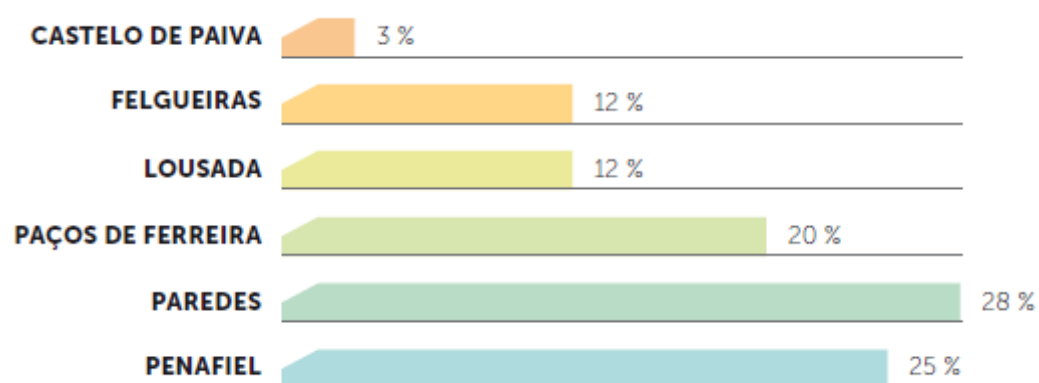
| MUNICÍPIO         | POPULAÇÃO RESIDENTE <sup>2</sup> | RSU DEPOSITADOS (TON) | CAPITAÇÃO DIÁRIA (KG/HAB/DIA) |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| CASTELO DE PAIVA  | 16.733                           | 4.711,66              | 0,77                          |
| FELGUEIRAS        | 58.065                           | 20.682,80             | 0,98                          |
| LOUSADA           | 47.387                           | 16.631,44             | 0,96                          |
| PAÇOS DE FERREIRA | 56.340                           | 22.089,46             | 1,07                          |
| PAREDES           | 86.854                           | 30.611,66             | 0,97                          |
| PENAFIEL          | 72.265                           | 23.917,00             | 0,91                          |
| <b>TOTAL</b>      | <b>337.644</b>                   | <b>118.644,02</b>     | <b>0,96</b>                   |

**Tabela V-3** – Material recolhido seletivamente no Vale do Sousa, por fileira, em 2012 <sup>[58]</sup>.

| MESES        | RESÍDUOS DE EMBALAGEM (ton.) |                 |                 |                      |             | OUTROS RESÍDUOS (ton.) |                 |               | TOTAL           |
|--------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------|------------------------|-----------------|---------------|-----------------|
|              | PLÁSTICOS                    | PAPEL/CARTÃO    | VIDRO           | EMBALAGENS METÁLICAS | MADEIRA     | SUCATA                 | REEE-MUNICÍPIOS | COLCHÕES      |                 |
| janeiro      | 110,22                       | 226,90          | 283,38          | 0,48                 | 0,00        | 9,02                   | 7,62            | 11,34         | 648,96          |
| fevereiro    | 88,66                        | 255,46          | 199,54          | 1,18                 | 0,00        | 6,82                   | 13,00           | 7,20          | 571,86          |
| março        | 97,44                        | 244,36          | 255,06          | 0,10                 | 0,00        | 7,88                   | 9,50            | 8,96          | 623,30          |
| abril        | 126,88                       | 210,26          | 289,80          | 0,00                 | 0,00        | 5,74                   | 3,78            | 7,94          | 644,40          |
| maio         | 117,38                       | 258,76          | 241,62          | 0,00                 | 0,00        | 3,92                   | 8,98            | 13,62         | 644,28          |
| junho        | 99,16                        | 179,50          | 227,84          | 0,00                 | 0,00        | 3,18                   | 3,00            | 6,06          | 518,74          |
| julho        | 86,48                        | 193,66          | 308,80          | 0,00                 | 0,00        | 6,26                   | 10,38           | 13,78         | 619,36          |
| agosto       | 108,20                       | 394,34          | 299,30          | 0,00                 | 0,00        | 4,90                   | 10,14           | 14,52         | 831,40          |
| setembro     | 90,00                        | 190,28          | 413,06          | 1,24                 | 0,00        | 1,66                   | 8,92            | 9,72          | 714,88          |
| outubro      | 108,70                       | 256,30          | 278,84          | 0,00                 | 0,00        | 7,00                   | 9,46            | 13,20         | 673,50          |
| novembro     | 100,02                       | 257,26          | 247,68          | 0,00                 | 0,00        | 3,34                   | 4,28            | 15,20         | 627,78          |
| dezembro     | 90,84                        | 261,10          | 204,16          | 0,00                 | 0,00        | 5,38                   | 5,56            | 3,08          | 570,12          |
| <b>TOTAL</b> | <b>1.223,98</b>              | <b>2.928,18</b> | <b>3.249,08</b> | <b>3,00</b>          | <b>0,00</b> | <b>65,10</b>           | <b>94,62</b>    | <b>124,62</b> | <b>7.688,58</b> |

**Figura V-2** – Distribuição percentual do material recolhido seletivamente no Vale do Sousa, por fileira, em 2012 <sup>[58]</sup>.





**Figura V-3** – Distribuição percentual do contributo de cada município para a reciclagem, em 2012 <sup>[58]</sup>.



## Anexo VI Análises de Fitotoxicidade



**Figura VI-1** – Fotografias dos vasos de referência (100 % turfa): **A** – No dia em que se semeou o Azevém; **B** – 9 dias depois de semear; **C** – 15 dias depois de semear (dia do corte).



**Figura VI-2** – Fotografias dos vasos com composto proveniente das pilhas 1A (25/50 e 50/50), 1B (25/50 e 50/50) e 1C (25/50 e 50/50): **A** – No dia em que se semeou o Azevém; **B** – 9 dias depois de semear; **C** – 15 dias depois de semear (dia do corte).





**Figura VI-3** – Fotografias dos vasos com composto proveniente das pilhas 2A (25/50 e 50/50), 2B (25/50 e 50/50) e 2C (25/50 e 50/50): **A** – No dia em que se semeou o Azevém; **B** – 9 dias depois de semear; **C** – 15 dias depois de semear (dia do corte).



**Figura VI-4** – Fotografias dos vasos com composto proveniente dos compostores C1 (25/50 e 50/50), C2 (25/50 e 50/50) e C3 (25/50 e 50/50): **A** – No dia em que se semeou o Azevém; **B** – 9 dias depois de semear; **C** – 15 dias depois de semear (dia do corte).