



Elisabete Alexandra Chainho

Licenciada em Ciências de Engenharia do Ambiente

Centrais de biomassa - Avaliação da solução de mistura das cinzas com composto orgânico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente, Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Artur João Lopes Cabeças, Mestre e
Professor Auxiliar Convidado Aposentado, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Maria da Graça Madeira Martinho
Arguente: Prof.^a Doutora Ana Isabel Espinha da Silveira
Vogal: Prof. Mestre Artur João Lopes Cabeças



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Dezembro, 2020

Centrais de biomassa - Avaliação da solução de mistura das cinzas com composto orgânico

© Copyright em nome de Elisabete Alexandra Chainho da Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

A ti, que sempre acreditaste no meu potencial e
nunca me deixaste desistir dos meus sonhos

AGRADECIMENTOS

A conclusão desta dissertação foi uma longa caminhada que não teria sido possível sem a colaboração de algumas pessoas, procurando expressar a minha gratidão por todos os intervenientes direta ou indiretamente.

Começo por agradecer ao meu orientador o professor Eng. Artur Cabeças por ter aceitado o desafio que esta dissertação implicou e ter feito tudo ao seu alcance para ser possível a sua realização, mesmo quando as coisas estavam difíceis. Queria agradecer pela sua constante partilha de sabedoria, ajuda e acima de tudo amizade e companheirismo ao longo deste processo.

À Eng. Maria José Sebastião da AMARSUL, S.A., pela disponibilidade para responder a questões e facultar as informações necessárias para a realização desta, bem como as amostras do composto utilizadas para a execução da dissertação.

Ao Eng. Carlos Alegria um muito obrigado, por ter facultado informação relativamente à Central Termoelétrica de Biomassa das Terras de Santa Maria, S.A., necessárias para o caso de estudo e as amostras das cinzas de fundo de biomassa.

À Eng. Maria José da FCT-NOVA pela disponibilidade, dedicação e pelo conhecimento transmitido ao longo do trabalho desenvolvido no laboratório.

Por fim e não menos importante, queria agradecer aos meus avós maternos, por terem sido os pais que nunca tive e terem alimentado a minha constante sede de conhecimento e ambição.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo avaliar as características que resultaram no composto orgânico “AMARTERRA” após adição, em diferentes percentagens, de cinzas de fundo provenientes da combustão da biomassa na Central Termoelétrica de Biomassa das Terras de Santa Maria S.A. O composto “AMARTERRA”, proveniente da central de Tratamento Mecânico Biológico (TMB) localizada no Ecoparque de Setúbal, resulta da compostagem da fração orgânica dos resíduos urbanos indiferenciados (após separação mecânica na linha de processo da TM), em pilhas assentes sobre caleiras com sistema de arejamento forçado, no edifício de compostagem. No processo de combustão da biomassa para a obtenção de energia a partir de caldeira, são formados dois subprodutos: as cinzas de fundo (escórias) e as cinzas volantes. As cinzas são retiradas em diferentes zonas da central e armazenadas por tipologia, em locais diferenciados. No que respeita às cinzas de fundo estas têm como destino final o aterro de resíduos industriais, face às suas características e legislação em vigor.

As experiências laboratoriais que foram realizadas incidiram sobre amostras de cinzas de fundo adicionadas ao composto maturado, em quantidade [*peso cinzas de fundo/peso total*] de 10%, 20% e 30%, tendo incidido sobre os seguintes parâmetros: pH em água, condutividade elétrica, humidade, matéria orgânica, granulometria, massa volúmica aparente e os metais pesados. Relativamente à determinação da quantidade de metais pesados, devido à elevada reatividade que inviabilizou a digestão ácida das amostras, não foi possível finalizar a sua concretização.

Previamente às misturas efetuadas, procedeu-se à avaliação das características do composto e das cinzas de fundo, de forma a se detetarem as posteriores alterações em cada uma das amostras analisadas. No que se refere às características empíricas do composto assinala-se que este possuía um odor ligeiro a amoníaco e a sua granulometria era consideravelmente granular. A sua maturação foi classificada como “*fresca de grau I ou II*” após analisado através do teste do auto-aquecimento. Observando as análises realizadas às cinzas de fundo pela empresa no seu processo de monitorização, verifica-se que possuíam uma baixa quantidade de metais pesados, possuindo um pH alcalino, uma baixa condutividade elétrica, humidade elevada e uma significativa percentagem de matéria orgânica. Relativamente às análises realizadas ao composto pela AMARSUL concluiu-se que este se inseria na categoria II.

Em conclusão do trabalho desenvolvido, considera-se que esta investigação permitiu obter informações que poderão futuramente ajudar a encontrar a solução mais equilibrada para a valorização de um subproduto que tem potencial para otimizar as características do composto orgânico. Deste modo, será possível evitar a deposição de cinzas de fundo em aterros, atendendo assim aos objetivos de uma verdadeira Economia Circular que necessita ser dinamizada.

Palavras-chave: Composto orgânico, cinzas de fundo, cinzas volantes, pH, condutividade elétrica, metais pesados, matéria orgânica, humidade, central de biomassa, TMB.

ABSTRACT

This thesis' goal is to evaluate the characteristics that result in the organic compost "AMARTERRA" after mixing different percentages of bottom ashes generated by the combustion of biomass at the Biomass Plant of Terras de Santa Maria, S.A. The "AMARTERRA" compost results from the organic fraction of the domestic waste (after mechanical separation forwarded to the mechanical treatment line), stored in piles laying on gutters with forced air on the composting building. On the other hand, the bottom ashes obtained from the Biomass Plant of Terras de Santa Maria, are the result of the combustion of biomass through a boiler to retrieve electric power, in which two by-products are formed: the bottom ashes and the fly ashes. The ashes are removed in different areas of the plant and stored, by typology, in different places. Regarding the bottom ashes, these have as final disposal the industrial waste landfill, given its characteristics and national legislation.

The laboratory experiments that were performed focused on the addition of ashes to the final compost, in the selected amounts [bottom ashes weight/total weight] of 10%, 20% and 30%. The following parameters were analyzed: pH in water, electrical conductivity, moisture, organic matter, granulometry, apparent bulk density and heavy metals. Heavy metals' content determination was not possible due to high reactivity during the acidic digestion which, in turn, rendered the sample unviable.

An assessment of the compost's characteristics and bottom ashes was performed to verify alterations in the analyzed samples. As for the compost's empirical characteristics, a grainy texture and a light smell of ammonia were identified. The maturation of the compost was classified as "category I or II fresh", analyzed through self-heating test.

Through analysis of the bottom ashes for the company's monitorization process, it was possible to observe low heavy metals' content, with an alkaline pH, low electric conductivity, high moisture, and significant organic matter. Regarding the analyzes carried out on the compost by AMARSUL, it was concluded that it fell into category II.

In conclusion, this investigation allowed obtaining information that may in the future help to find the most balanced solution for the valorization of a by-product that has the potential to optimize the characteristics of organic compost. In this way, the deposition of bottom ash in landfills can be avoided, thus meeting the objectives of a circular economy in this regard.

Keywords: Organic compost, bottom ash, fly ash, pH, electric conductivity, heavy metals, organic matter, moisture, Biomass Plant, Biological and Mechanic Treatment.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento geral.....	1
1.2. Objetivos do estudo.....	2
1.3. Organização da dissertação.....	2
2. ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO.....	5
2.1. Enquadramento legislativo e políticas ambientais.....	5
2.1.1. A nível Europeu.....	5
2.1.2. Portugal Continental.....	6
2.2. Matérias fertilizantes.....	9
2.3. A demanda da produção de energia.....	11
2.3.1. Centrais termoelétricas de biomassa.....	13
2.3.2. Viabilidade técnico-económica de centrais termoelétricas.....	13
3. GESTÃO DOS RESÍDUOS URBANOS.....	15
3.1. Organização do sector em Portugal Continental.....	15
3.2. Cumprimento das metas estabelecidas para Portugal Continental.....	17
3.3. Metas por SGRU.....	19
3.4. Produção de resíduos ao nível da comunidade europeia.....	22
3.5. O composto produzido a partir de resíduos urbanos.....	24
3.6. O setor dos resíduos e a pandemia pelo COVID-19.....	25
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	27
4.1. Compostagem.....	27
4.1.1. Parâmetros a controlar durante processo de compostagem.....	28
4.1.2. A cinética do processo de compostagem.....	30
4.1.3. Avaliação da qualidade final do composto.....	31
4.1.4. O grau de maturação e a estabilidade do composto.....	31
4.1.5. A massa volúmica aparente e a granulometria.....	33
4.1.6. O pH.....	33
4.1.7. Condutividade elétrica.....	34
4.1.8. A matéria orgânica, sólidos voláteis ou matéria volátil.....	34
4.2. Digestão anaeróbia.....	35
4.3. A energia gerada a partir da biomassa.....	37
4.3.1. Origem da biomassa.....	38
4.4. A mistura de composto com cinzas de fundo de biomassa para controlo do processo de compostagem.....	41
5. CASO DE ESTUDO.....	45
5.1. Centrais Termoelétricas de Biomassa.....	45
5.1.1. Central Termoelétrica de Biomassa de Terras de Santa Maria, S.A.....	47
5.2. Ecoparque de Setúbal da AMARSUL S.A.....	48
5.2.1. Processo da central de Tratamento Mecânico e Biológico.....	49
5.2.2. Central de Tratamento Mecânico e Biológico do Ecoparque de Setúbal.....	49
6. METODOLOGIA.....	55
6.1. Composto “Amarterra” e as cinzas de fundo da central de biomassa.....	55

6.2.	Granulometria.....	57
6.2.1.	Material e equipamento.....	57
6.2.2.	Procedimento experimental.....	57
6.2.3.	Tratamento dos dados.....	57
6.3.	Determinação da estabilidade do composto	57
6.3.1.	Material e equipamento.....	57
6.3.2.	Procedimento experimental.....	57
6.4.	Humidade	58
6.4.1.	Material e equipamento.....	58
6.4.2.	Procedimento experimental.....	58
6.4.3.	Tratamento dos dados.....	58
6.5.	pH (H ₂ O) e Condutividade Elétrica a 25 °C.....	58
6.5.1.	Materiais e Equipamentos	58
6.5.2.	Procedimento experimental.....	58
6.6.	Matéria volátil	59
6.6.1.	Materiais e equipamentos	59
6.6.2.	Procedimento experimental.....	59
6.6.3.	Tratamento de dados	60
6.7.	Massa Volúmica Aparente	60
6.7.1.	Material e equipamentos	60
6.7.2.	Procedimento experimental.....	60
6.7.3.	Tratamento dos dados.....	60
7.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	61
7.1.	Enquadramento	61
7.1.1.	Análise empírica	62
7.1.2.	Composto “AMARTERRA”	62
7.1.3.	Cinzas de fundo ou escórias	62
7.1.4.	Amostras das misturas de cinzas de fundo com composto “AMARTERRA”	63
7.1.5.	Parâmetros analisados.....	64
7.1.6.	Síntese global.....	76
8.	CONCLUSÕES.....	79
8.1.	Principais limitações.....	82
8.2.	Trabalhos futuros.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
	ANEXOS.....	89
I.	CÁLCULO DA CAPITAÇÃO DE RU.....	90
II.	CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DE FUNDO	91
III.	CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO “AMARTERRA”	92
IV.	CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA 25°C	95
V.	TRATAMENTO DOS RESULTADOS.....	96
VI.	BOLETIM DO COMPOSTO RICATERRA®	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cadeia de valor: Origem, matérias-primas e o produto final.	2
Figura 2.1 - Potência instalada por tipo de energia renovável (Fonte: Adaptado de <i>Energia em números</i> , 2020).	12
Figura 2.2 - Consumo de energia por setor (Fonte: Adaptado de <i>Energia em números</i> , 2020).	12
Figura 3.1 – SGRU em Portugal Continental (Fonte: <i>PERSU 2020+</i> , 2019).	15
Figura 3.2 - Capitação de resíduos urbanos (kg/hab.ano) e as metas para Portugal continental e regiões autónomas (Fonte: Adaptado de <i>REA</i> , 2018; <i>PERSU 2020+</i> , 2019).	17
Figura 3.3 - Encaminhamento direto dos resíduos entre 2016 e 2019 (Fonte: Adaptado de <i>REA</i> , 2018; <i>PERSU 2020+</i> , 2019).	18
Figura 3.4 - Destino final dos resíduos em 2019 (Fonte: Adaptado do <i>PERSU 2020+</i> , 2019) ..	18
Figura 3.5 - A quantidade de RUB depositados em aterro (10 ³ toneladas), % de RUB em aterro e metas estabelecidas (Fonte: Adaptado de <i>REA</i> , 2018; <i>RARU</i> , 2019).	19
Figura 3.6 - Capitação de RU por SGRU (Fonte: Adaptado de <i>RARU</i> , 2019)	20
Figura 3.7 - Deposição de RUB em aterro por SGRU e a respetiva meta estabelecida em % para o ano de 2019. (Fonte: Adaptado de <i>RARU</i> , 2019)	20
Figura 3.8 - Destino direto dos RU por SGRU em 2019 (Fonte: Adaptado do <i>RARU</i> , 2019)	21
Figura 3.9 - Destino final dos RU por SGRU em 2019 (Fonte: Adaptado de <i>PERSU 2020+</i> , 2019).	21
Figura 3.10 - Capitação de RU a nível europeu para o ano de 2017 e 2018. (Fonte: EUROSTAT, 2020a)	22
Figura 3.11 - Tratamento dos resíduos na EU em 2018 (Fonte: EUROSTAT, 2020b).	23
Figura 3.12 - Composto produzido por origem (Fonte: Adaptado de <i>RARU</i> , 2019).	24
Figura 3.13 - Composto produzido em Portugal Continental. (Fonte: Adaptado de <i>RARU</i> 2019)	25
Figura 3.14 - Composto para a agricultura por classe (Fonte: Adaptado do <i>RARU</i> 2019).	25
Figura 4.1 - O processo de compostagem (Adaptado de Epstein, 2011)	29
Figura 4.2 - Fases do processo de compostagem (Adaptado de Epstein, 2011).	30
Figura 4.3 - As fases da digestão anaeróbia e os produtos formados (Fonte: Adaptado de Sousa, 2006 e Isam <i>et al.</i> , 2016 citando Martinho <i>et al.</i> , 2011).	36
Figura 5.1 - O ciclo da biomassa.	45
Figura 5.2 - Fluxograma da Central de Biomassa das Terras de Santa Marta, S.A.(Fonte: CBTSM)	47
Figura 5.3 - Diagrama da TMB de Setúbal.	50
Figura 5.4 - Área de receção e descarga em abre-sacos.	50
Figura 5.5 - Linha de Tratamento Mecânico.	51
Figura 5.6 - Edifício da Compostagem. Máquina de deposição automática	52
Figura 5.7 - Edifício de afinação.	52
Figura 5.8 - Parque de composto.	53
Figura 5.9 - <i>Scrubber</i> ácido.	53

Figura 5.10 - Biofiltro	54
Figura 6.1- Metodologia de amostragem (quarteamento).	56
Figura 6.2 - Medição do pH (esquerda) e da CE (direita).	59
Figura 7.1 - Amostras de composto da “Amarterra” (Fotos tiradas pela autora).	62
Figura 7.2 - Cinzas de fundo da combustão de biomassa (Foto da autora).....	63
Figura 7.3 - Mistura de cinzas de fundo com o composto: <i>mistura 1</i> , <i>mistura 2</i> e <i>mistura 3</i> (Foto tirada pela autora).	64
Figura 7.4 - Distribuição da granulometria para as cinzas de fundo, composto e misturas 1,2 e 3.	66
Figura 7.5 – pH em água do composto, cinzas de fundo. <i>mistura 1</i> , <i>mistura 2</i> e <i>mistura 3</i>	67
Figura 7.6 - Condutividade elétrica do composto, cinzas de fundo e <i>mistura 1,2</i> e 3.	68
Figura 7.7 - Percentual de matéria volátil nas cinzas de fundo, composto, misturas 1, 2 e 3....	70
Figura 7.8 - Percentagem de humidade por PMI presente nas cinzas de fundo, composto, <i>mistura 1</i> , 2 e 3.....	70
Figura 7.9 - Massa volúmica aparente do composto, AMARSUL, <i>mistura 1</i> , <i>mistura 2</i> e <i>mistura 3</i>	72
Figura 7.10 - Síntese dos dados obtidos nos ensaios laboratoriais.	76

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 6.1 - Cálculo da granulometria retida num crivo de x mm em %.	57
Equação 6.2 - Humidade da amostra em %.	58
Equação 6.3 - Cálculo da matéria volátil presente na amostra em %.	60
Equação 6.4 - Massa volúmica aparente em kg/m ³ ou g/l.....	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Aplicações do composto por classe de matéria fertilizante adaptado do Quadro 7 do Decreto-Lei nº 103/2015.	10
Tabela 2.2 - Valores máximos admissíveis de metais pesados em fertilizantes orgânicos segundo o Anexo I do Decreto-lei nº 103/2015.	10
Tabela 2.3 - Valores máximos admitidos de materiais inertes antropogénicos e, pedras em %, segundo o Quadro 4 do Decreto-lei nº 103/2015.....	11
Tabela 3.1 - Grupo de cada SGRU e tipologia de recolha praticada.....	16
Tabela 4.1 - O efeito da salinidade nas culturas. (Adaptado de Epstein 2011).....	34
Tabela 4.2 – Tecnologia utilizada para a compostagem e a quantidade de cinza adicionada ao composto, por autor.	41
Tabela 5.1 - Centrais termoelétricas, dedicadas e de cogeração a operar em Portugal. (Fonte: E2p, n.d.)	46
Tabela 6.1 - Cronologia dos ensaios laboratoriais	56
Tabela 7.1 - Parâmetros analisados durante a dissertação e nome das amostras.....	61
Tabela 7.2 - Distribuição percentual por dimensão das partículas.	65
Tabela 7.3 - pH das cinzas de fundo, composto e das misturas 1, 2 e 3.	66
Tabela 7.4 - Análise ao parâmetro da condutividade elétrica a 25°C.....	68
Tabela 7.5 - Análise ao parâmetro da matéria volátil a 550°C.	69
Tabela 7.6 - Análise ao parâmetro da humidade a 105°C.	70
Tabela 7.7 - Resultados do parâmetro da massa volúmica aparente (kg/m³).....	71
Tabela 7.8 – Comparação entre os metais pesados nas cinzas de fundo e no composto “AMARTERRA” utilizado nas análises e o utilizado nos ensaios de Kuba <i>et al.</i> (2008).....	72
Tabela 7.9 - Valores limite por classe de fertilizante orgânico para a agricultura na Áustria e em Portugal.	73
Tabela 7.10 – Análise aos metais pesados através de balanço de massas sem reação.	74
Tabela 7.11 - Tabela comparativa de um composto de TMB e recolha seletiva (Fonte: Tabela VI.1 do anexo VI).....	75
Tabela 7.12 - Tabela comparativa do composto “AMARTERRA” e “RICATERRA” em comparação com a legislação em vigor para os metais pesados.	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
C/N	Razão Carbono/Azoto
CE	Condutividade Elétrica
CH₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DA	Diretiva Aterros
DQR	Diretiva Quadro Resíduos
ENRRUBDA	Estratégia Nacional para Redução dos Resíduos Urbanos Biodegradáveis Destinados aos Aterros
Eq.	Equivalente
EU	<i>European Union</i>
GAG	Grupo de Apoio à Gestão
GEE	Gases de efeito de estufa
H₂O	Água
HAP	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
ICP-AES	<i>Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry</i> Espectrometria de Emissão Atômica com Fonte de Plasma Indutivamente Acoplado
LER	Lista Europeia de Resíduos
LOI	<i>Loss-on-ignition</i>
m.s	Matéria seca
NH₃	Amónia
PCI	Poder Calorífico Superior
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
PIB	Produto Interno Bruto
PMI	Perda de Massa por Ignição
PMx	Partículas de dimensão x
PO SEUR	Programa Operacional de Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos
PPRU	Programa de Prevenção de Resíduos Urbanos
RAP	Responsabilidade Alargada do Produtor
REA	Relatório do Estado do Ambiente
RESP	Rede Elétrica de Serviço Público
RGGR	Regime Geral da Gestão de Resíduos
RUB	Resíduos Urbanos Biodegradáveis
RU	Resíduos Urbanos
SGRU	Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos
TGR	Taxa de Gestão de Resíduos

TM	Tratamento Mecânico
TMB	Tratamento Mecânico e Biológico
EU	União Europeia
BTEX	Grupo de compostos formado por Hidrocarbonetos
PAHs	Hidrocarboneto Aromático Policíclico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

Com o crescimento populacional e a constante demanda pela energia, existe a necessidade de se criarem alternativas à deposição em aterro dos subprodutos cujo potencial permita a valorização de um recurso, nomeadamente, a biomassa florestal para a geração de energia.

Neste caso os subprodutos gerados no processo das centrais de biomassa são as cinzas volantes e as cinzas de fundo em quantidades elevadas, cujo destino final são os aterros industriais. Com efeito, como a composição destas cinzas de fundo não apresentam características dos resíduos urbanos, a legislação em vigor apenas permite como destino final o aterro industrial, com elevados custos de deposição. É assim importante encontrar uma alternativa para a valorização das cinzas de fundo, ao encontro de uma real Economia Circular.

Por outro lado, com o aumento populacional e o crescimento económico associado ao contínuo consumo de produtos e bens, sejam embalagens, alimentos e outros, o destino final dos resíduos urbanos (RU) produzidos que ainda se apresenta com a maior percentagem de utilização, é o aterro sanitário. Mas o caminho que se pretende no futuro é apenas permitir a descarga direta de resíduos não valorizáveis em aterro até 10% em 2035, passando assim a ser uma solução de último recurso. Para isso a solução futura passa pelo aumento da recolha seletiva e valorização dos biorresíduos, bem como dos resíduos de embalagens e a sua respetiva reciclagem e retoma, estes com metas que se apresentam bastante exigentes. Perante este quadro de exigências, o aumento da compostagem aeróbia ou anaeróbia ou, por digestão anaeróbia, será no futuro a principal solução para a valorização dos biorresíduos recolhidos separadamente, com a produção expectável de elevadas quantidades de composto orgânico.

Neste contexto, para além de existirem já pesquisas para a aplicação das cinzas de fundo na indústria do cimento, tintas, construção de estradas bem como aplicação em solos florestais, importa encontrarem-se outras alternativas de valorização das cinzas de fundo. Neste sentido, o trabalho que se propôs teve como objetivo a preparação de um substrato para utilização em agricultura e/ou jardinagem constituído por [*composto + cinzas de fundo*]. Considerou-se interessante testar diferentes proporções dos dois componentes de forma a chegar a uma formulação ótima. Para estabelecer as misturas foi determinante conhecer as características do composto e das cinzas de fundo como: a massa volúmica, a granulometria, o pH, a condutividade elétrica, a matéria orgânica e a humidade. As determinações realizadas consistiram em amostras com diferentes composições - 10%, 20% e 30% de cinzas de fundo em comparação com a quantidade de composto AMARTERRA utilizado na mistura.

É com o objetivo de se poder valorizar as cinzas de fundo em mistura equilibrada com o composto orgânico, que este trabalho procura obter informações importantes que permitam abrir uma janela de oportunidade para uma solução que beneficie também o processo de compostagem. Procura-se encontrar uma solução cuja cadeia de valor permita obter mais valias na valorização de ambos os produtos, nomeadamente dos nutrientes presentes na mistura, permitindo a sua

aplicação em solos com essas necessidades, seja como fertilizante ou corretivo orgânico e, que se evite a deposição em aterro das cinzas de fundo, enquanto recurso com valor económico. Apresenta-se na figura 1.1 a cadeia de valor que se pretende discutir no âmbito desta dissertação:

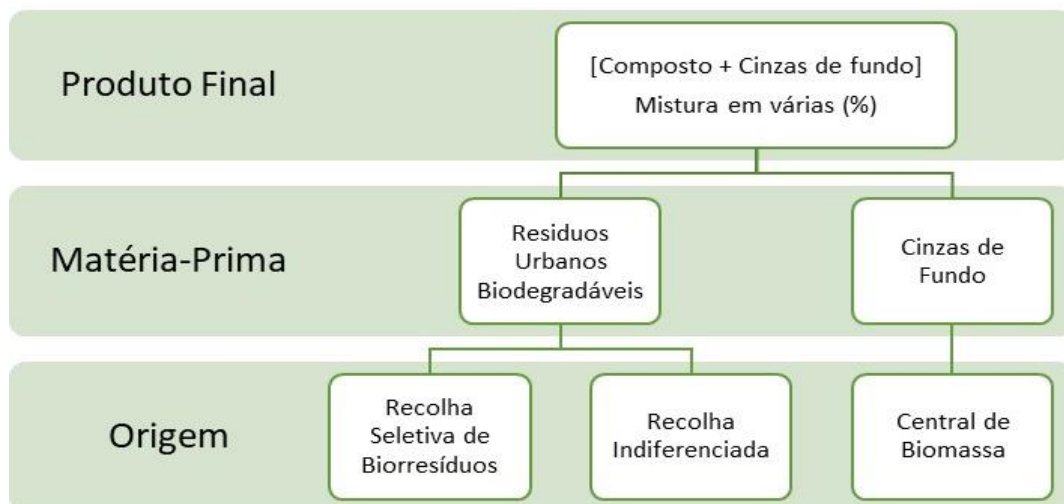


Figura 1.1 – Cadeia de valor: Origem, matérias-primas e o produto final.

1.2. Objetivos do estudo

O objetivo deste estudo passa por avaliar as características de um produto final que poderá ser relevante na área dos resíduos em análise, ou seja; analisarem-se os efeitos resultantes da incorporação (em diferentes composições) de cinzas de fundo produzidas na combustão da biomassa florestal, com composto orgânico obtido após processo de compostagem dos resíduos de origem indiferenciada na Central da Amarsul, S.A., de modo a obter-se um substrato para utilização em agricultura e/ou jardinagem com melhores características.

Sendo um desafio inovador, colocou-se previamente um conjunto de questões para investigação que se procura responder com base na avaliação dos resultados das análises laboratoriais a realizar sobre as amostras realizadas, a saber:

- ✓ Com a adição de cinzas de fundo ao composto, o pH aumenta?
- ✓ Quanto mais cinzas de fundo forem adicionadas, maior será a humidade do composto?
- ✓ A salinidade no composto aumentará com a adição das cinzas de fundo?
- ✓ A adição de cinzas de fundo não irá aumentar os metais pesados face ao composto original?
- ✓ A massa volúmica aumentará com o aumento das cinzas de fundo no composto?
- ✓ A matéria orgânica diminuirá com o aumento das cinzas de fundo no composto?

1.3. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em oito capítulos:

1. Introdução

Neste capítulo abordou-se o enquadramento dos subprodutos gerados no processo de combustão de centrais de biomassa florestal, quer na geração de energia, quer relativo à sua elevada produção com destino final apenas o aterro industrial.

Pretendendo-se avaliar e discutir os resultados da cadeia de valor da solução inovadora resultante da adição dos referidos subprodutos na obtenção de um produto final melhorado com valor económico (em resposta aos objetivos da economia circular), colocaram-se questões na investigação cujas respostas permitirão concluir da possibilidade, ou não, desta solução.

2. Enquadramento legislativo

Neste capítulo abordam-se as Diretivas Europeias e os Decretos-Lei para o sector dos resíduos urbanos e para as centrais termoelectricas de biomassa, relevando-se o enquadramento legal das políticas em vigor em Portugal e na Europa em matéria de gestão de resíduos urbanos (RU).

3. Gestão de resíduos urbanos

Neste capítulo aborda-se o estado de arte em Portugal ao nível dos resíduos urbanos e o cumprimento das metas estabelecidas, quer a nível nacional quer dos Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU). Aborda-se também o estado de arte na Europa dos RU.

4. Revisão da literatura

Este capítulo incide sobre os fundamentos teóricos relacionados com os parâmetros que influenciam a compostagem e a qualidade do composto bem como os diferentes métodos de tratamento de RU. Sobre as cinzas de fundo da combustão de biomassa explicitam-se as diferentes características face à sua proveniência e fatores que influenciam os seus parâmetros.

5. Caso de estudo

O caso de estudo tem como base o composto “AMARTERRA” produzido no sistema multimunicipal AMARSUL SA. e, as cinzas de fundo da combustão de biomassa na Central Termoelectrica das Terras de Santa Marta, S.A. São descritos os processos e tecnologias de ambas as empresas e, avaliados os resultados das análises laboratoriais realizadas por cada empresa, respetivamente, sobre o composto orgânico e as cinzas de fundo. Para o objetivo pretendido foram fornecidas pelas empresas o composto “AMARTERRA” e, as cinzas de fundo. As análises laboratoriais realizaram-se no laboratório da FCT- Universidade Nova de Lisboa.

6. Metodologia

Neste capítulo são apresentadas as metodologias aplicadas para a formação das amostras de mistura resultantes da adição de diferentes percentagens de cinzas de fundo ao composto, bem como o conjunto de análises das amostras realizadas e o método de tratamento dos dados.

7. Análise e discussão dos resultados

Apresentam-se os resultados obtidos nas análises realizadas aos parâmetros definidos e, discutem-se os respetivos resultados obtidos. Adicionalmente, faz-se uma análise teórica comparativa ao composto utilizado e às cinzas de fundo para o conteúdo de metais pesados.

8. Considerações finais

Neste capítulo abordar-se-ão as conclusões retiradas dos resultados dos ensaios bem como as dificuldades encontradas e as limitações do estudo realizado para se responder às questões colocadas no início da dissertação. Por fim, formulam-se sugestões de continuidade para os trabalhos futuros a serem realizados nesta matéria.

2. ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO

2.1. Enquadramento legislativo e políticas ambientais

Neste capítulo identificam-se de forma resumida as políticas ambientais adotadas e o respetivo enquadramento legislativo em resultado das mesmas, quer a nível da União Europeia (UE) quer em Portugal Continental.

2.1.1. A nível Europeu

A Cimeira de Paris em 1972 constituiu um evento marcante nas políticas relacionadas com a proteção ambiental a nível europeu. Em conformidade com a Cimeira foi criado o *1º Programa de Ação em Matéria do Ambiente* na qual eram referidos princípios como o poluidor-pagador e o princípio da precaução. Deste modo, o tratamento de resíduos tinha como objetivos contribuir através das restrições impostas na UE para a proteção dos recursos naturais, proteção da saúde humana e a melhoria da qualidade ambiental. A gestão de resíduos na Europa na década de 90 centrava-se já numa economia circular, na reciclagem e na reutilização, tendo em vista a otimização do processo de eliminação, bem como uma adequada monitorização.

De modo a atingir estes objetivos teria de se implementar instrumentos de regulamentação e económicos, relatórios estatísticos de modo a comparar informações, planos eficientes de gestão de resíduos e a devida legislação. A diretiva 1999/31/CE, de 26 de abril de 1999, denominada de “Diretiva Aterro” (DA), transposta em 2011 pela diretiva 2011/97/EU, estava focada nos resíduos que não deviam ser depositados em aterro sendo estes: os pneus, os resíduos líquidos inflamáveis, explosivos ou corrosivos e resíduos provenientes de instalações hospitalares ou veterinárias. Esta diretiva pretendia minimizar os impactes negativos da deposição de resíduos em aterros nos solos, nas águas subterrâneas, na atmosfera e na saúde humana.

Todavia, os principais marcos que atualmente marcam a estratégia e legislação que ocorreram associada à gestão de resíduos a nível comunitário, salientam-se os seguintes:

- *Adoção, pela Comissão Europeia do Pacote Resíduos, que estabelece novas regras para a gestão de resíduos, incluindo a obrigatoriedade de recolha seletiva de biorresíduos (a partir de 2024) e, também, de têxteis e pequenas frações de resíduos perigosos domésticos (a partir de 2025) e estabelece objetivos vinculativos e ambiciosos para a reciclagem, visando a promoção da hierarquia de resíduos e a redução da quantidade de resíduos urbanos a depositar em aterro;*
- *Estabelecimento dos requisitos mínimos aplicáveis a todos os regimes de Responsabilidade Alargada do Produtor (RAP), definindo novas responsabilidades;*
- *Revisão da “Diretiva Embalagens”, com estabelecimento dos requisitos mínimos obrigatórios e os limites para os custos a cobrir nestes sistemas de gestão, preconizando a obrigatoriedade de os Estados-Membros estabelecerem RAP para todas as embalagens até ao final de 2024;*

- *Aumento do nível de ambição colocado nas novas metas europeias que vai ao encontro aos desígnios da transição para uma economia circular, o que coloca desafios de grande complexidade que exigem respostas inequívocas, pluridisciplinares e integradas para a sua resolução, nomeadamente alterações estratégicas, reconversão de tecnologia e mudança de comportamentos;*
- *Em alinhamento com a Estratégia da UE para o Plástico, a recente proposta de Diretiva relativa à redução do impacto de certos produtos de plástico no ambiente, perspetiva novas abordagens avançando com medidas de redução, prevenção e gestão, entre as quais a previsão de sistemas de depósito de embalagens, a restrição de colocação no mercado de certos produtos descartáveis e novas metas de recolha seletiva;*
- *A utilização mais eficiente dos recursos naturais, tendo em vista os GEE;*
- *Os resíduos passem a ser considerados como recursos;*
- *Prevenção de resíduos através de sensibilização quer dos produtores como dos consumidores para a utilização eficiente dos recursos;*
- *Prevenção de resíduos alimentares em concordância com a Agenda para o Desenvolvimento Sustentável 2030 com a redução para metade dos resíduos alimentares desperdiçados globais per capita;*
- *Incentivos à recolha de produtos alimentares e a devida distribuição;*
- *Medidas no sentido da prevenção e resolução do problema do lixo marinho;*
- *Uma bioeconomia sustentável de modo a reduzir matérias-primas importadas diminuindo a dependência de exportação;*
- *Investimento no ecodesign dos produtos e implementação de taxas que permitam diferenciar a quantidade de material utilizado no produto.*

Em síntese, a nível europeu o contexto estratégico e legislativo está enquadrado pela revisão das Diretivas pela Comissão Europeia relacionadas com a gestão de resíduos no Pacote da Economia Circular, no qual se inclui a Estratégia Europeia para os Plásticos. Assim, os estados membros terão de dinamizar políticas nacionais e regionais alinhadas com as diretivas estabelecidas na comissão europeia, bem como cumprir com os objetivos e as metas exigidas nesta área dos resíduos, demonstrando o seu compromisso na resolução dos problemas de ordem ambiental e de saúde pública.

2.1.2. Portugal Continental

No início da década 90, Portugal demonstrava um acentuado atraso na gestão dos resíduos urbanos. Estes eram depositados essencialmente em lixeiras estimando-se que apenas 20% destes resíduos eram devidamente depositados em aterro sanitário ou, com tratamento mínimo nas duas instalações de compostagem que existiam. A recolha seletiva de resíduos de embalagens evidenciava taxa abaixo de 1%, estando centrada nas embalagens de vidro.

Perante a situação existente, em 1996 é aprovado o primeiro plano nacional para o setor dos resíduos urbanos, o “Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU)” para o período

1997-2007, onde se estabeleceram objetivos focados no encerramento de lixeiras (cerca de 400) e a construção de aterros sanitários ambientalmente corretos, bem como a criação de infraestruturas complementares para a gestão adequada dos resíduos urbanos e de fluxos específicos, através da constituição de SGRU a nível regional, agregando municípios por áreas de intervenção. Este, foi o primeiro passo na resolução da situação caótica que Portugal tinha neste setor. Em meados da década de 90 começam, entretanto a serem transpostas para o direito nacional as novas políticas setoriais europeias. Concretizados os principais objetivos do *PERSU* para o período 1997-2007, é elaborado o *PERSU II* para o horizonte 2007-2016, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de setembro, consagrando uma nova política com objetivos concretos a cumprir, quer a nível nacional quer pelos SGRU.

Adicionalmente, é aprovado pelo Despacho nº 21295/2009 de 26 de agosto a Estratégia para os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR), uma alternativa para a eliminação da fração resto do tratamento nas TMB, viabilizando a sua valorização energética em instalações cimenteiras. As principais linhas orientadoras e estratégicas do *PERSU II* possuíam como política de base:

- *Hierarquia assente na política dos 3 R's: "Reduzir, reutilizar e reciclar";*
- *Compromisso a redução dos GEE como estabelecido no "Protocolo de Quioto";*
- *Reforço da separação na origem dos resíduos, por tipo de material na fonte;*
- *Reduzir a deposição em aterro sanitário;*
- *Incentivar a valorização energética da fração não reciclável;*
- *Sustentabilidade dos sistemas de gestão de RU.*

Os cinco eixos de atuação que estruturaram e consubstanciaram a estratégia do *PERSU II* com vista a garantir uma adequada gestão dos RU e o cumprimento dos compromissos nacionais e europeus em matéria de gestão de resíduos, tiveram como objetivo:

- *Recolha seletiva de embalagens e resíduos de embalagens (para cumprimento das metas de reciclagem e valorização definidas para 2011);*
- *Redução da deposição de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) em aterro (cumprimento da meta estabelecida pela Diretiva Aterros para o horizonte 2009 a 2016);*
- *Recolha de resíduos de papel/cartão não embalagem (metas definidas no Plano).*
- *Ao abrigo do PPRU a produção de resíduos urbanos não exceder os 421 kg/(hab.ano) e até ao ano de 2020 não exceder os 410 kg/(hab.ano);*
- *Adoção da regra de cálculo da preparação para reutilização e reciclagem, aplicada através do método de cálculo 2, conforme Diretiva Quadro de Resíduos (DQR);*

A implementação do *PERSU II* contribuiu para que, no período 2007-2012, tenham ocorrido alterações importantes no setor de gestão de resíduos urbanos, nomeadamente:

- *Modificações na configuração dos sistemas de gestão de RU e também das opções de gestão dos RU, alinhadas com a legislação comunitária entretanto transposta;*

- *Aumento do número de unidades de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) destinadas à valorização orgânica e reciclagem de RU e melhoria da rede de recolha seletiva, nomeadamente de ecopontos, ecocentros e circuitos de recolha porta-a-porta.*
- *Reforço de aplicação da hierarquia da gestão de resíduos, tendente a uma sociedade mais vocacionada para a reciclagem e a uma forte aposta na valorização orgânica de resíduos biodegradáveis;*

Realizada a avaliação intercalar do *PERSU II* constatou-se, entretanto que existia um desvio acentuado das metas definidas para a deposição de RUB em aterro, bem como para as capitulações de recolha seletiva, que se situavam inferiores às estabelecidas.

Apesar do país, na globalidade ter cumprido as metas de reciclagem de resíduos de embalagens estabelecidos na Diretiva Embalagens¹, os objetivos definidos para 2012 relativos à valorização de RUB e recolha seletiva de resíduos não foram atingidos (*PERSU 2020+*, 2019). Os dados disponíveis relativamente à valorização de RUB, registavam um desvio de 280 kt face ao previsto no *PERSU II* para esse ano e, no caso da recolha seletiva de resíduos de embalagens a capitação média anual situava-se nos 37 kg/(hab.ano)², valor inferior a 50 kg/(hab.ano) recomendado para 2011.

Nesta conformidade foi decidido proceder-se, em 2014, à revisão do *PERSU II*. Da revisão efetuada resulta o *PERSU 2020*, aprovado em setembro de 2014, que abrange os resíduos urbanos cuja gestão é da responsabilidade dos Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos (SGRU).

Neste definiu-se a visão, os objetivos, as metas globais, as metas específicas por cada SGRU e, as medidas a implementar no quadro da gestão de resíduos urbanos no período 2014 -2020, incluindo a estratégia para a sua execução.

Todavia, com a elaboração do “*Relatório de Avaliação de 2017 do PERSU 2020*” pelo Grupo de Apoio à Gestão (GAG) do *PERSU 2020*, embora reconhecendo uma evolução positiva, concluiu que a tendência de aproximação às metas era insuficiente para que fossem alcançados os objetivos preconizados para 2020, apontando a necessidade de ajustamentos na estratégia nacional para os resíduos urbanos. Acresce que paralelamente, ocorre (*PERSU 2020+*, 2019):

- *A revisão da legislação europeia através da DQR, Diretiva das Embalagens e Resíduos de Embalagens e, Diretiva Aterros colocando um novo paradigma em conformidade com os novos desafios da economia circular.*
- *Os novos desafios, passam a ter enquadramento na estratégia setorial dos resíduos, com particular enfoque nos resíduos urbanos.*
- *Devido a contingências jurídicas das instâncias europeias por uma queixa apresentada contra o estado português por dúvida sobre apoios do Estado a entidade privada, verifica-se um atraso em cerca de dois anos na aprovação das candidaturas efetuadas pelos SGRU ao*

¹ Diretiva 94/62/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 20 de dezembro de 1994, relativa às embalagens e aos resíduos de embalagens.

² Considerando recolhas de vidro, papel/cartão, plásticos, metais e madeira em ecopontos, porta-a-porta, ecocentros e circuitos especiais.

apoio por fundos estruturais, impedindo que os respetivos investimentos pudessem ser realizados.

- *Por outro lado, os dados do Relatório do Estado do Ambiente (REA) 2018, apurados em 2017, não revelaram uma melhoria significativa na maioria dos principais indicadores setoriais.*

Perante o novo paradigma resultante da revisão da legislação europeia, a constatação dos dados do REA de 2018 e, os constrangimentos associados ao atraso nos investimentos por parte dos SGRU devido às contingências jurídicas das instâncias europeias que impediram durante dois anos os acessos aos fundos comunitários no quadro do PO SEUR, (*Relatório Anual dos Resíduos Urbanos [RARU]*, 2019). a comissão europeia acordou numa extensão daquele prazo até ao ano de 2022, aprovado, entretanto pela Portaria n.º 241-B/2019. Esta extensão foi então considerada na elaboração do *PERSU 2020+*, documento complementar do *PERSU 2020* que considerou as novas metas (no âmbito dos resíduos urbanos) resultantes da revisão da DQR, suporte legislativo aprovado em 2018 pela Comissão Europeia, ou sejam (REA, 2019):

- *Recolha seletiva de biorresíduos até 31 de dezembro de 2023, sendo que apenas os biorresíduos recolhidos seletivamente poderão ser contabilizados na taxa de reciclagem;*
- *Redução de 10% dos RU depositados em aterro até 2035, no total de 788 452 t;*
- *Preparação para reutilização e reciclagem dos RU, sendo cerca de 55% até 2025, de 60% até 2030 e 65% até 2035;*
- *A partir 2025 a obrigatoriedade de recolher seletivamente têxteis e resíduos perigosos domésticos;*
- *A partir de 2030 a proibição de deposição em aterro de resíduos recicláveis;*
- *Apenas se contabiliza para os reciclados nas TMB, os biorresíduos que tenham sido alvo de recolha seletiva a partir de 1 de janeiro de 2027;*
- *Alteração no método de cálculo das taxas de reciclagem do método 2 para o método 4.*

As políticas nacionais em vigor neste sector têm assim de convergir num único sentido, que será o de procurar sensibilizar a população e as empresas para o impacte que o cumprimento destas ambiciosas metas exigirão ao setor dos resíduos.

Porém, a comunicação regular das ações implementadas no sector junto da UE é fundamental pois é importante demonstrar que as políticas ambientais vão ao encontro das exigentes metas, no sentido da sustentabilidade ambiental e da preservação dos recursos naturais.

2.2. Matérias fertilizantes

O regulamento (EU) 2019/1009 considera que “ *A promoção de uma maior utilização de nutrientes reciclados deverá ainda contribuir para o desenvolvimento da economia circular e permitir, de uma forma geral, uma utilização mais eficiente dos nutrientes....*” e, estabelece as regras relativamente aos resíduos que podem ser valorizados e aplicados como produtos fertilizantes, entre eles produtos à base de cinzas de fundo e resíduos valorizados (em conformidade com o artigo 16º que define o fim do estatuto de resíduo consoante condições

descritas no artigo 6º e, a devida declaração acordada pela UE). De acordo com este regulamento é definido como composto “*todos os biorresíduos recolhidos seletivamente e aditivos ao processo de compostagem que melhorem o desempenho, desde que devidamente cumpridas as normas ambientais e que abranja a utilização como produto fertilizantes*”.

Conforme se apresenta na tabela seguinte, as matérias fertilizantes são divididas em classes de acordo com a sua aplicação final.

Tabela 2.1 - Aplicações do composto por classe de matéria fertilizante adaptado do Quadro 7 do Decreto-Lei nº 103/2015.

Classe da matéria fertilizante	Aplicação
Classe I e II	Agricultura
Classe II A	Culturas agrícolas arbóreas, arbustivas e silvícolas
Classe III	Solos na qual não existam culturas destinadas a alimentação animal e humana

O decreto-lei nº 103/2015 transpõe o regulamento (CE) nº 2003/2003, estando estabelecidas as análises a serem realizadas, a metodologia de amostragem do composto assim como, o tipo de incorporação que poderá ser realizada no composto. No anexo II do referido decreto-lei temos:

- *Matéria orgânica: O teor mínimo de matéria orgânica de 30%;*
- *Humidade: Um teor máximo de humidade de 40%;*
- *Granulometria: 99% do material que constitui a matéria fertilizante deve passar num crivo de malha de 25 mm;*
- *O pH da matéria fertilizante deve se encontrar estabelecido entre 5,5 e 9,0;*
- *As análises de fitotoxicidade devem segundo o anexo V revelar ausência de fitotoxicidade;*
- *As matérias de origem orgânica não podem apresentar por 25g de matéria seca o microrganismo Salmonella spp;*
- *Valor menor a 1000 células de Escherichia Coli por cada grama de matéria fertilizante;*
- *Sementes e propágulos de infestantes menos de 3 unidade ativas por 1 litro.*

Sublinha-se que a quantidade de um dado metal pesado no composto, constitui um dos fatores determinantes para definir a classe de matéria fertilizante. Na tabela 2.2 identifica-se o limite-máximo admissível de cada um dos metais pesados, como estabelecido no Anexo II.

Tabela 2.2 - Valores máximos admissíveis de metais pesados em fertilizantes orgânicos segundo o Anexo I do Decreto-lei nº 103/2015.

Parâmetros	Matéria fertilizante (mg/ kg m.s.)			
	Classe I	Classe II	Classe II A	Classe III
Cádmio (Cd)	0,7	1,5	3	5
Chumbo (Pb)	100	150	300	500
Cobre (Cu)	100	200	400	600
Crómio (Cr)	100	150	300	400
Mercúrio (Hg)	0,7	1,5	3	5
Níquel (Ni)	50	100	200	200
Zinco (Zn)	200	500	1000	1500

Relativamente à presença de materiais com dimensão superior a 2 mm como vidro, metais e plásticos, constituem também um fator determinante para a qualidade final do composto (tabela 2.3). Assinale-se que também se encontra previsto que as cinzas volantes da combustão de turfa ou de madeira não tratada (10 01 01), podem ser consideradas como matéria fertilizantes. Na tabela seguinte encontra-se definida a quantidade permitida para cada inerte.

Tabela 2.3 - Valores máximos admitidos de materiais inertes antropogénicos e, pedras em %, segundo o Quadro 4 do Decreto-lei nº 103/2015.

Parâmetro	Matéria fertilizante (%)			
	Classe I	Classe II	Classe II A	Classe III
Materiais inertes antropogénicos	0,5	1	2	3
Pedras > 5mm	5	5	5	-

2.3. A demanda da produção de energia

A geração de energia pode provir de fontes renováveis à escala humana como a eólica, biomassa, hídrica, solar e geotérmica ou de fontes não renováveis como é o caso do crude, do carvão e do gás natural. Em 1999 o Protocolo de Quioto foi determinante na produção de formas de energia renováveis, de modo a limitar as emissões de metano e de CO₂, que incentivava os países a proteger as florestas. Este protocolo desencadeou uma alteração nos setores dos transportes e da energia (RARU, 2018).

Saliente-se a Estratégia Nacional para as Florestas de 2006 (Resolução de Conselho de Ministros n.º 114/2006, de 15 de setembro) que veio reconhecer a importância económica, social e ambiental que o setor das florestas representava para o desenvolvimento nacional, sublinhando ainda a relevância da recolha da biomassa florestal na proteção da floresta como forma de contribuir para a diminuição do risco de incêndios florestais.

Por outro lado, a Estratégia para a Energia com o horizonte 2020 (Resolução de Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15 de abril), veio também reforçar a importância das energias renováveis e a utilização da política energética para o crescimento da independência energética e financeira nacional bem como, o desenvolvimento económico territorialmente equilibrado.

O aumento da utilização de fontes de energia de origem fóssil tem-se revelado prejudicial para o ambiente e para a saúde pública. Estes gases emitidos para a atmosfera na sua combustão, como o metano e o CO₂ alteram o ciclo do carbono causando um aumento da temperatura na atmosfera (alterações climáticas). Também as partículas que possuem alguns metais encontram-se associadas a patologias como algumas doenças respiratórias e cardiovasculares. Em 2018 estima-se que foram emitidos para a atmosfera cerca de 67,4 Mt CO₂ eq. menos 4,5% do que no ano anterior (*Energia em números*, 2020). Em resultado destas consequências os cientistas têm vindo a aconselhar decisores a obter energia de fontes de origem renováveis que possuam menores emissões de gases de efeito de estufa.

Em Portugal têm sido implementadas políticas no sentido de diminuir a pegada carbónica, sendo o 7º país da União Europeia com menos emissões de dióxido de carbono por habitante (cerca de 6,9 t CO₂ eq.).

Em 2019, Portugal possuía uma potência instalada de cerca de 14 370 MW correspondente a formas de energia de origem renovável, uma subida de 0,7% face a 2018 (*Energia em números*, 2020). Na figura 2.1 é possível observar a potência instalada de energia em Portugal em 2018 por tipo de energia de origem renovável:

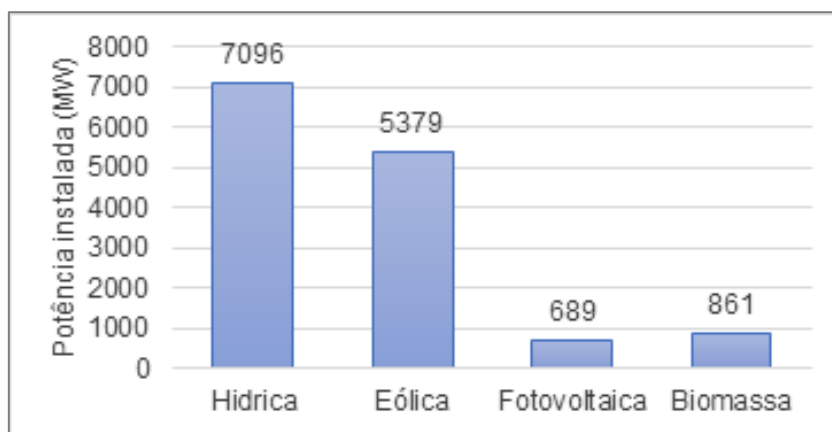


Figura 2.1 - Potência instalada por tipo de energia renovável (Fonte: Adaptado de *Energia em números*, 2020).

Como se pode constatar a biomassa corresponde em Portugal a uma potência instalada de 861 MW. Ora, sendo a biomassa um recurso pouco valorizado, o processo de aproveitamento para geração de energia elétrica, térmica ou até para produção de biocombustíveis, é fundamental dentro dos princípios e dos objetivos de uma economia circular.

Em média, um habitante em Portugal consumiu no ano de 2018 cerca 4,76 MWh de energia, um aumento de 2,7% face ao ano de 2017 face a um maior investimento em bombas de calor.

Em termos de consumo, em 2018 o setor dos transportes continuou a ser o principal consumidor de energia (35,7%), seguido da indústria (29,5%), doméstico (17,7%), serviços (14,2%) e agricultura e pescas (2,8%).

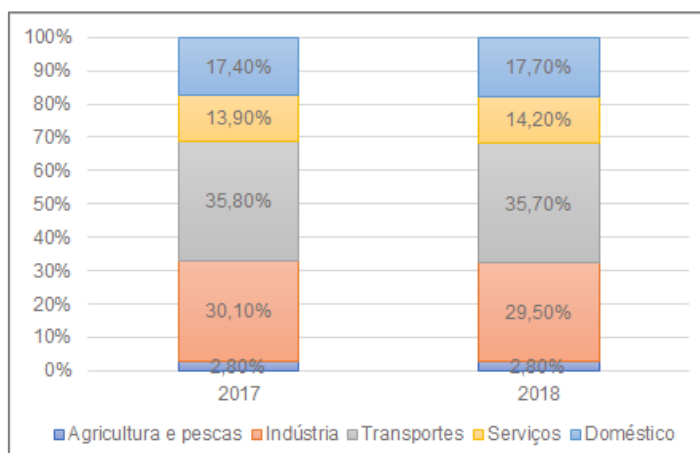


Figura 2.2 - Consumo de energia por setor (Fonte: Adaptado de *Energia em números*, 2020).

2.3.1. Centrais termoelétricas de biomassa

Portugal não sendo um país com recursos fósseis conhecidos, tem vindo a aproveitar essa limitação para dinamizar outras fontes mais inovadoras na produção de energia com objetivos ambiciosos para uma maior eficiência energética, nomeadamente, através da produção de energia por Fontes de Energia Renováveis (FER). Em particular, nas centrais de produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, a potência instalada para produção de energia elétrica cresceu, desde 2008, cerca de 35% (4 GW). Em igual período, a potência instalada das centrais de produção de eletricidade não renovável diminuiu cerca de 3%. Ora, as centrais termoelétricas de biomassa constituem uma alternativa à geração de energia elétrica e térmica, tendo como principal vantagem uma maior valorização económica da propriedade florestal (utilizada para a produção de energia), contribui para a mitigação não só do problema dos incêndios, como de outros, sejam de origem sanitária (proliferação de pragas e doenças) ou facilidade de acessibilidade ao interior dos espaços florestais. Esta pretensão tem vindo a ter uma crescente evolução, sendo de assinalar que nos últimos cinco anos verificou-se que cerca de 57% da biomassa foi utilizada para transformação em centrais termoelétricas (térmicas dedicadas, cogeração e outras), e cerca de 34% do total de biomassa endógena é utilizada diretamente para produção de calor, maioritariamente no setor residencial. Acresce que no decreto-lei 120/2019, que altera o decreto-lei nº 64/2017, estabelece que as novas centrais de biomassa devem privilegiar a produção de energia térmica, instituindo que a potência injetada na RESP não deve exceder os 60 MW até um máximo de 10 MW por central.

2.3.2. Viabilidade técnico-económica de centrais termoelétricas

A decisão sobre a viabilidade técnico-económica de uma central de biomassa tem por base a sua localização na proximidade de biomassa disponível para consumo sustentável e, poder situar-se junto de indústrias consumidoras de *energia* ou de [*energia* + *calor*]. Saliente-se que a utilização de biomassa florestal em central de cogeração de calor e eletricidade apresenta maiores eficiências globais face à central dedicada apenas para produção de energia elétrica. Todavia, importa ter em consideração que os resíduos de exploração florestal e de silvicultura, assim como os matos, devem ser utilizados racionalmente na produção de energia. Esta utilização deve ser limitada e enquadrada no limite de gestão florestal sustentável, nomeadamente nos aspetos relacionados com a conservação de solos e com a promoção de diversidade biológica (CELPA, 2004). Relativamente ao funcionamento das centrais de biomassa, durante a combustão processada são gerados dois tipos de resíduos, respetivamente, cinzas volantes e cinzas de fundo, que têm de ter o adequado destino final face às suas características. De acordo com a decisão 2014/955/EU estes resíduos, segundo a LER, são classificados quanto à sua origem, com os seguintes códigos:

- 10 01 01 quando são cinzas de fundo, escórias e poeiras de caldeiras ou,
- 10 01 03 quando são cinzas volantes da combustão de turfa ou madeira não tratada.

Com efeito as suas características físicas e químicas são diferentes em termos dos impactes ambientais associados.

3. GESTÃO DOS RESÍDUOS URBANOS

3.1. Organização do sector em Portugal Continental

A produção de resíduos resulta das atividades humanas, sendo a quantidade produzida, um reflexo dos hábitos de consumo bem como do poder de compra da população.

O crescimento populacional aliado a um crescimento económico potenciou o consumo de produtos com o consequente aumento da quantidade de resíduos gerados e problemas na deposição final destes. A necessidade de criar produtos aumentou o consumo de recursos renováveis e não renováveis estimando-se que desde 1900 o consumo de recursos aumentou cerca de 10 vezes (REA, 2018).

Com a adesão de Portugal à União Europeia, em 1986, surgiu a necessidade de melhorar os sistemas de deposição de resíduos, bem como criar sistemas de recolha de resíduos e de fluxos específicos (RARU, 2018). Em 1996 conforme o descrito no *PERSU*, procedeu-se o encerramento de lixeiras a céu aberto e os resíduos que não podiam ser reaproveitados passaram a ser encaminhados para aterros sanitários (RARU, 2018).

De acordo com o decreto-lei n.º 73/2011, um resíduo constitui “qualquer substância ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou a obrigação de se desfazer”.

Os resíduos encontram-se divididos quanto à fonte em: urbanos, hospitalares, industriais e outros. Estes também podem ser caracterizados quanto à sua perigosidade dividindo-se em resíduos perigosos e não perigosos. A Lista Europeia de Resíduos (LER), categoriza os resíduos sendo que os dois primeiros números constantes do código referem se ao setor na qual os resíduos são originados.

Todos os resíduos que se encontram assinalados com um asterisco (*) em frente ao código, são considerados resíduos perigosos.

Relativamente à gestão do sector de resíduos urbanos em Portugal Continental, este está organizado através de 23 SGRU, 12 os sistemas multimunicipais e 11 os sistemas intermunicipais conforme consta na figura 3.1.

A recolha de resíduos urbanos indiferenciados é assegurada por 255 entidades gestoras, sendo que apenas 27 destas são diretamente responsáveis por recolha multimaterial.

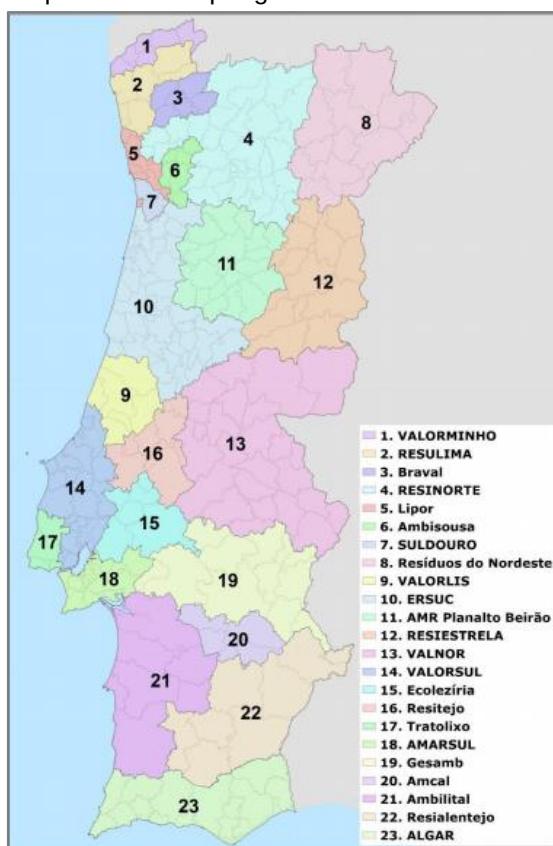


Figura 3.1 – SGRU em Portugal Continental
(Fonte: *PERSU 2020+*, 2019)

Os SGRU encontram-se agrupados em quatro grupos A, B, C e D, (*Cluster*) que se caracterizam através das suas características idênticas (REA, 2018).

Esta organização teve em conta os fatores como: a produção média de resíduos urbanos, a densidade populacional e o rendimento médio disponível do agregado familiar.

Na tabela seguinte pode-se observar o grupo a que pertence cada um dos SGRU, bem como a tipologia de recolha que realizam nos respetivos universos geográficos de intervenção.

Tabela 3.1 - Grupo de cada SGRU e tipologia de recolha praticada

Grupo pertencente	Sistema de Gestão de Resíduos Urbanos	Recolha multimaterial	Recolha indiferenciada
A	Ambilital	Sim	Não
	Amcal		
	Ecobeirão		
	Ecoleziria		
	Resialentejo		
	Resíduos do Nordeste		
	Resistrela		
	Valnor		
	Valorminho		
B	Ambisousa		
	Braval		
	Gesamb		
	Resulima		
	Valorlis		
C	Algar		
	Amarsul		
	Ersuc		
	Resinorte		
	Suldouro		
D	Lipor		Sim
	Tratolixo		
	Valorsul		

Em 2017, as capacidades que os sistemas de gestão dispunham para valorização orgânica, energética e multimaterial e, aterro sanitário, era de (RARU, 2018);

- Valorização Orgânica de 898 419 t;
- Valorização energética de 1 115 840 t;
- Valorização multimaterial (triagem) entre 101 595 t a 203 190 t;
- Aterro Sanitário de 16 067 595 t.

3.2. Cumprimento das metas estabelecidas para Portugal Continental

O aumento do poder de compra e consequente subida do PIB têm sido notoriamente relacionadas com o aumento do consumo de produtos e consequente produção de resíduos.

Na figura 3.2 observa-se que a capitação de RU por habitante para Portugal Continental, aumentou entre 2017 e 2018, resultado do efeito provocado pela subida do PIB, tendo descido ligeiramente em 2019.

Após 2014 a quantidade de resíduos gerados aumentou e traduziu-se no incumprimento da meta estabelecida para 2016 (diminuição para 421 kg/hab.ano) no *PERSU 2020*.

Para o ano de 2020, estabelecia-se uma meta de redução da produção de RU para 410 kg/hab.ano, existindo um alargamento do prazo para o cumprimento desta meta para 2022, como definido no *PERSU 2020+*.

Em 2019 a quantidade de resíduos gerados foi de 501 kg/hab.ano, muito aquém da meta estabelecida para cumprimento em 2022 (figura 3.2.).

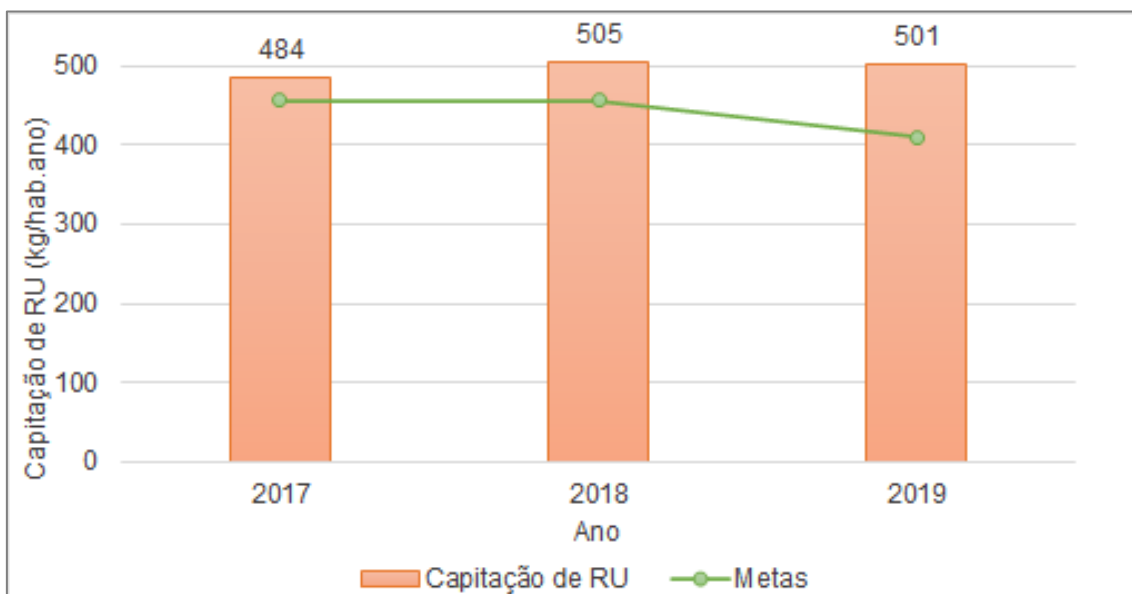


Figura 3.2 - Capitação de resíduos urbanos (kg/hab.ano) e as metas para Portugal continental e regiões autónomas (Fonte: Adaptado de REA, 2018; *PERSU 2020+*, 2019).

No que respeita ao destino direto dos RU, este continua a ser maioritariamente o aterro sanitário (figura 3.3), apesar das políticas em vigor motivarem para o encaminhamento para outras formas de aproveitamento dos resíduos, colocando o aterro sanitário como última solução na deposição direta de RU.

Assinale-se, no entanto, que desde 2017 o encaminhamento dos resíduos para TMB e valorização orgânica, energética e material têm vindo a aumentar.

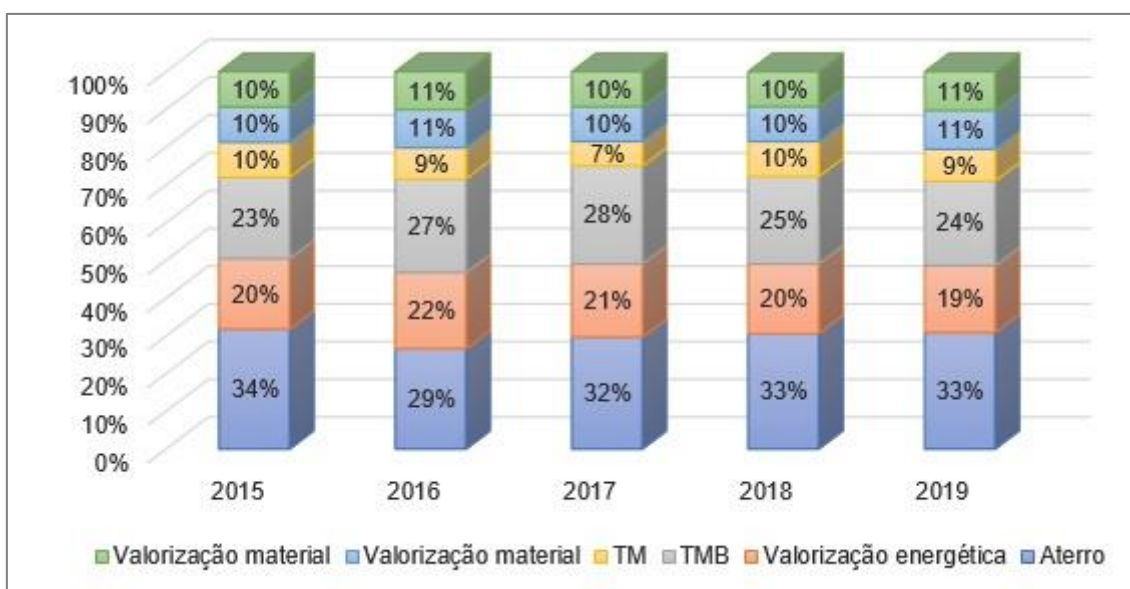


Figura 3.3 - Encaminhamento direto dos resíduos entre 2016 e 2019 (Fonte: Adaptado de REA, 2018; PERSU 2020+, 2019).

No entanto, o encaminhamento direto dos resíduos constitui apenas uma das componentes a ter em conta relativamente ao destino dos RU em Portugal, tendo ainda de se considerar o destino final. Em 2019, o destino final de 57,6 % dos resíduos continuava a ser o aterro sanitário, menos do que em 2018 (figura 3.4).

Comparando a 2018, aumentaram-se o encaminhamento para outras formas de valorização e também se valorizou mais energeticamente.

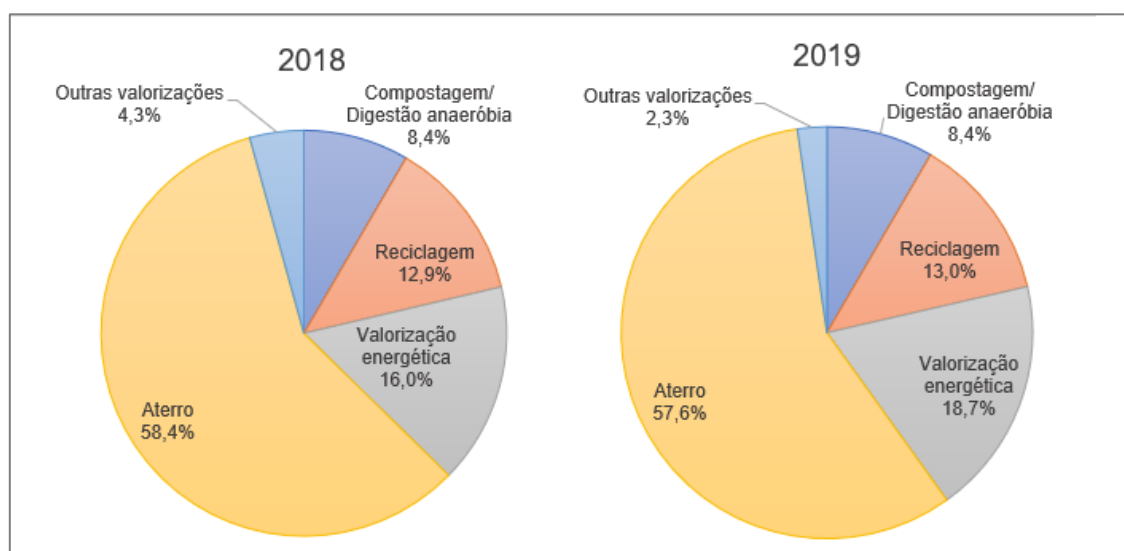


Figura 3.4 - Destino final dos resíduos em 2019 (Fonte: Adaptado do PERSU 2020+, 2019)

A deposição de resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) em aterro tem sido mencionados no PERSU 2020, cuja meta estabelecia que até 31 de dezembro de 2020 que o total de RUB teria de ser de apenas 35% face ao ano de 2011 (788 452 t).

A redução deste em aterro implica o encaminhamento para a valorização orgânica como o processo de compostagem ou incineração.

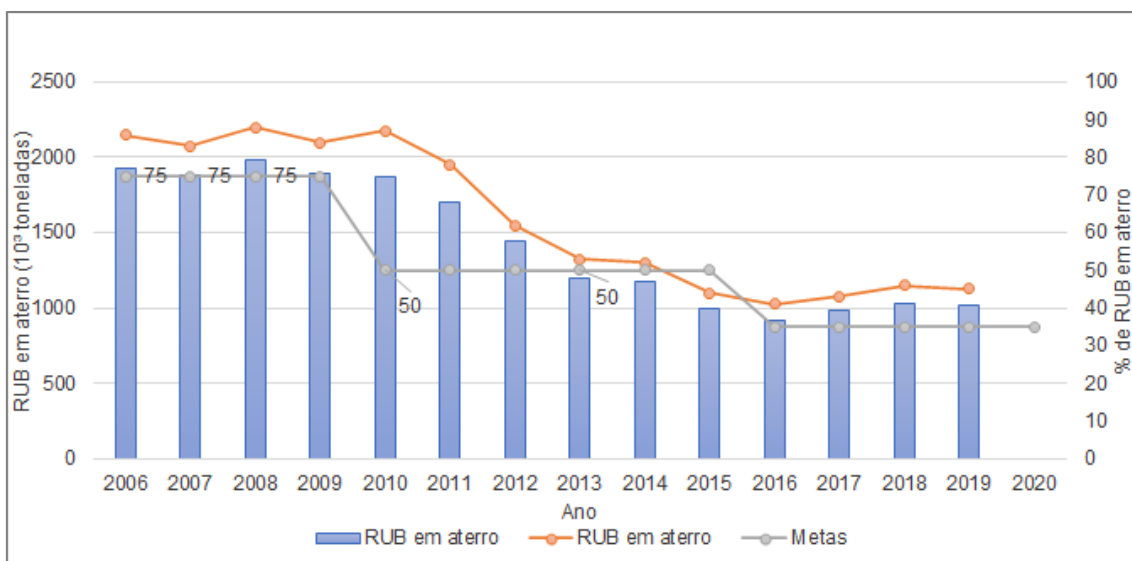


Figura 3.5 - A quantidade de RUB depositados em aterro (10^3 toneladas), % de RUB em aterro e metas estabelecidas (Fonte: Adaptado de REA, 2018; RARU, 2019).

A quantidade de RUB depositado em aterro diminuiu entre 2006 e 2007 e de 2010 a 2016, tendo subido ligeiramente em 2008, 2010, 2017 e 2018 face ao ano anterior.

O *ENRRUBDA* definia em conjunto com o *PERSU II* metas para 2006 e 2009 e o *PERSU 2020* estabelecia metas para 2016, que não foram alcançadas.

Em 2020, o *PERSU 2020* define como meta 35% de RUB em aterro, no entanto foi realizado um ajustamento às estratégias através do *PERSU 2020+* que define que até 2023 passará a ser obrigatória a recolha seletiva de RUB, mantendo assim a meta de cumprimento anteriormente referida.

3.3. Metas por SGRU

Este capítulo tem como objetivo demonstrar a situação atual dos resíduos para o ano de 2019 por SGRU, bem como as metas estabelecidas no Despacho nº 3350/2015.

As metas que se encontram estabelecidas por sistema vão de encontro à necessidade de cumprimento das metas a nível nacional.

O SGRU com a maior capitação de Portugal Continental é a Algar, devido à população flutuante que não é considerada resultado do turismo na zona do Algarve.

A figura 3.6 encontra-se ordenada por capitação sendo possível observar que o SGRU com menos capitação é o Planalto Beirão.

Os dados presentes na figura seguinte foram tratados e como tal, são apresentados no anexo I na tabela I.1.

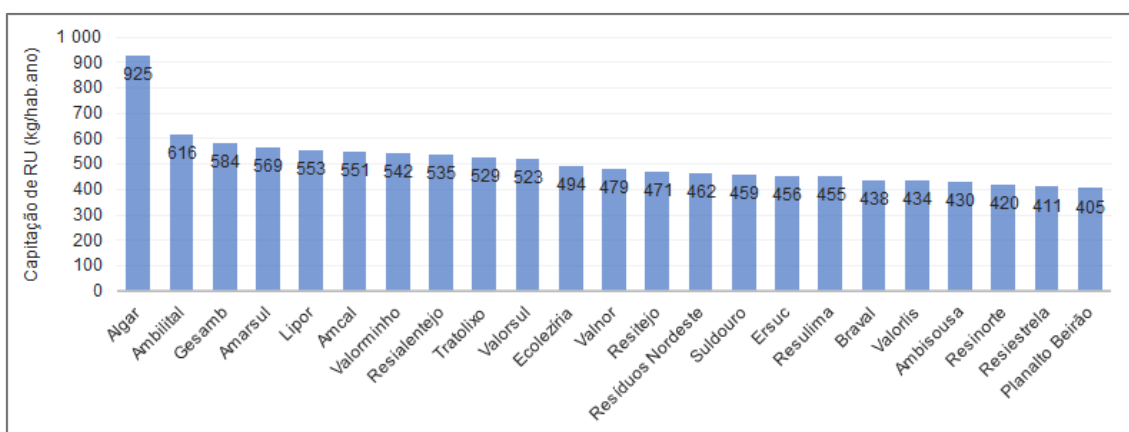


Figura 3.6 - Capitação de RU por SGRU (Fonte: Adaptado de RARU, 2019)

Quanto à deposição de RUB em aterro dos 24 sistemas cumpriram a meta estabelecida 7 sistemas, encontrando-se estes assinalados a verde escuro na figura 3.7.

É importante referir que a Algar possui recolha seletiva de resíduos verdes, possuindo 3 infraestruturas de valorização orgânica destes. A Lipor e a Valorsul são as únicas unidades que atualmente recolhem seletivamente os seus biorresíduos de origem doméstica.

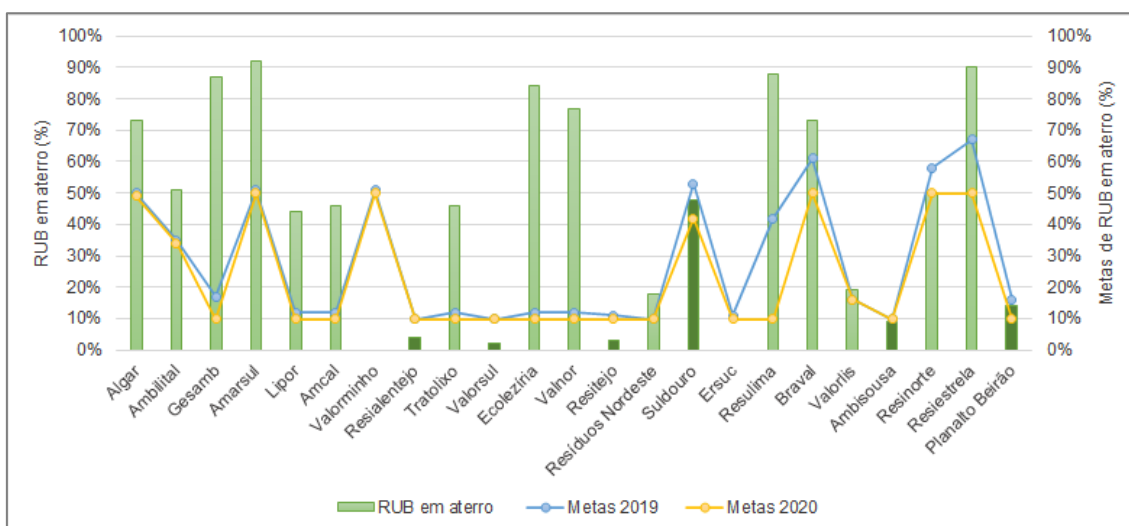


Figura 3.7 - Deposição de RUB em aterro por SGRU e a respetiva meta estabelecida em % para o ano de 2019. (Fonte: Adaptado de RARU, 2019)

Os 3 SGRU's que mais encaminharam diretamente para aterro foram ordenadamente: a Ambiscousa, a Valorminho e a Resulima. A Ecolezíria encaminha os seus resíduos com destino a aterro para a Resitejo porque não possui um aterro sanitário ativo.

As 2 unidades de valorização energética ativas em Portugal Continental encontram-se a ser exploradas pela Lipor e pela Valorsul, que se encontram no Porto e em Lisboa, representando os SGRU's que possuem valorização energética.

A unidade de valorização orgânica da Resitejo aguarda licenciamento, tendo-se considerado unicamente o tratamento fornecido pelas unidades de TM.

A Ersuc possui 2 unidades de valorização orgânica em exploração, sendo junto com a Ecoleziria as que mais encaminham resíduos para TMB. A unidade de valorização orgânica da Planalto Beirão encontra-se atualmente em fase de teste explicando assim a ausência de valorização orgânica.

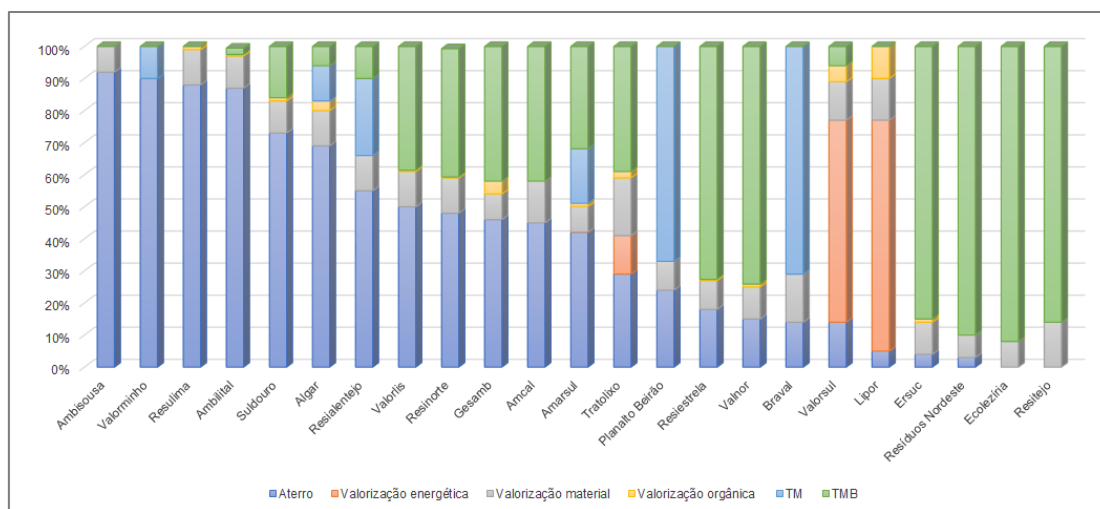


Figura 3.8 - Destino direto dos RU por SGRU em 2019 (Fonte: Adaptado do RARU, 2019)

Na figura 3.9. encontra-se representado o destino final dos RU, sendo visível que a tendência quanto à valorização energética mantém-se pelos motivos apresentados anteriormente.

Quanto ao SGRU que mais deposita em aterro como destino final manteve-se a Ambisouza, seguindo-se a Valorminho e a Ambilital.

Os SGRU's que mais encaminharam os seus resíduos para reciclagem foi a Resitejo, seguindo-se a Ecoleziria. A Valnor constitui o SGRU que mais encaminha os seus resíduos finais para compostagem/digestão anaeróbia.

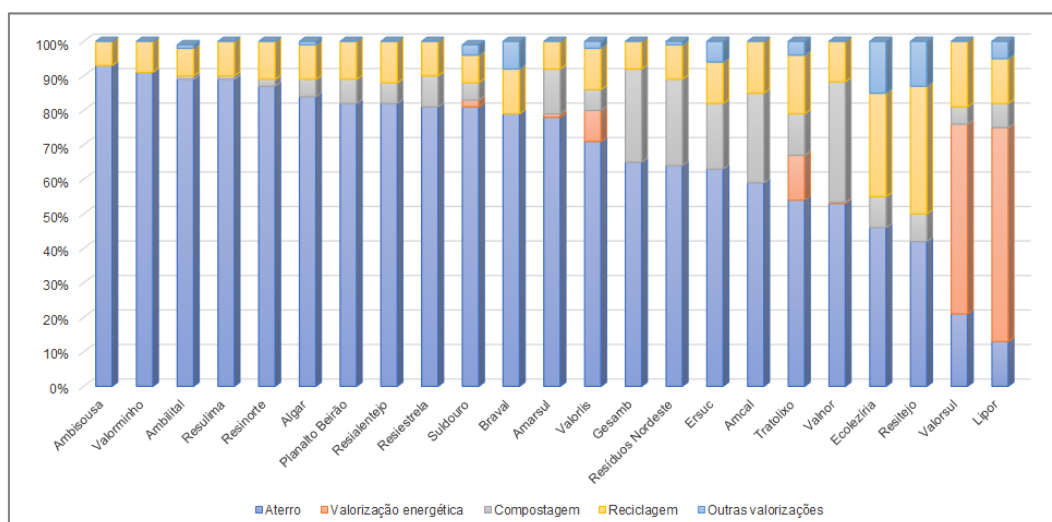


Figura 3.9 - Destino final dos RU por SGRU em 2019 (Fonte: Adaptado de PERSU 2020+, 2019).

3.4. Produção de resíduos ao nível da comunidade europeia

A quantidade de resíduos produzidos constitui uma das preocupações, encontrando-se as políticas direcionadas para uma sensibilização à utilização sustentável dos recursos naturais e redução na aquisição de produtos.

Ao longo deste capítulo irão ser desenvolvidos temas como a gestão de resíduos a nível europeu, procurando relacionar com a atual situação dos resíduos em Portugal.

Na figura 3.10 é possível observar que o país que mais resíduos produziu *per capita* foi a Dinamarca destacando que também demonstrou ser o país que mais reduziu face ao ano anterior, sendo a Roménia o que menos resíduos produziu. É de destacar que a capitação de RU em Portugal subiu consideravelmente, assim como na Eslovénia, Eslováquia, Polónia, República Checa, Croácia, Lituânia, Itália, Finlândia, Irlanda e Malta.

A Islândia, o Chipre, a Malta, a Áustria e a Grécia não comunicaram os valores para o ano de 2018 não sendo possível comparar estes. Dos 28 países representados, 9 países apresentaram uma redução na sua capitação e 4 mantiveram esses valores face ao ano anterior. Comparando os dados de 2017 e 2018 o país que mais aumentou a sua produção de RU foi a Finlândia.

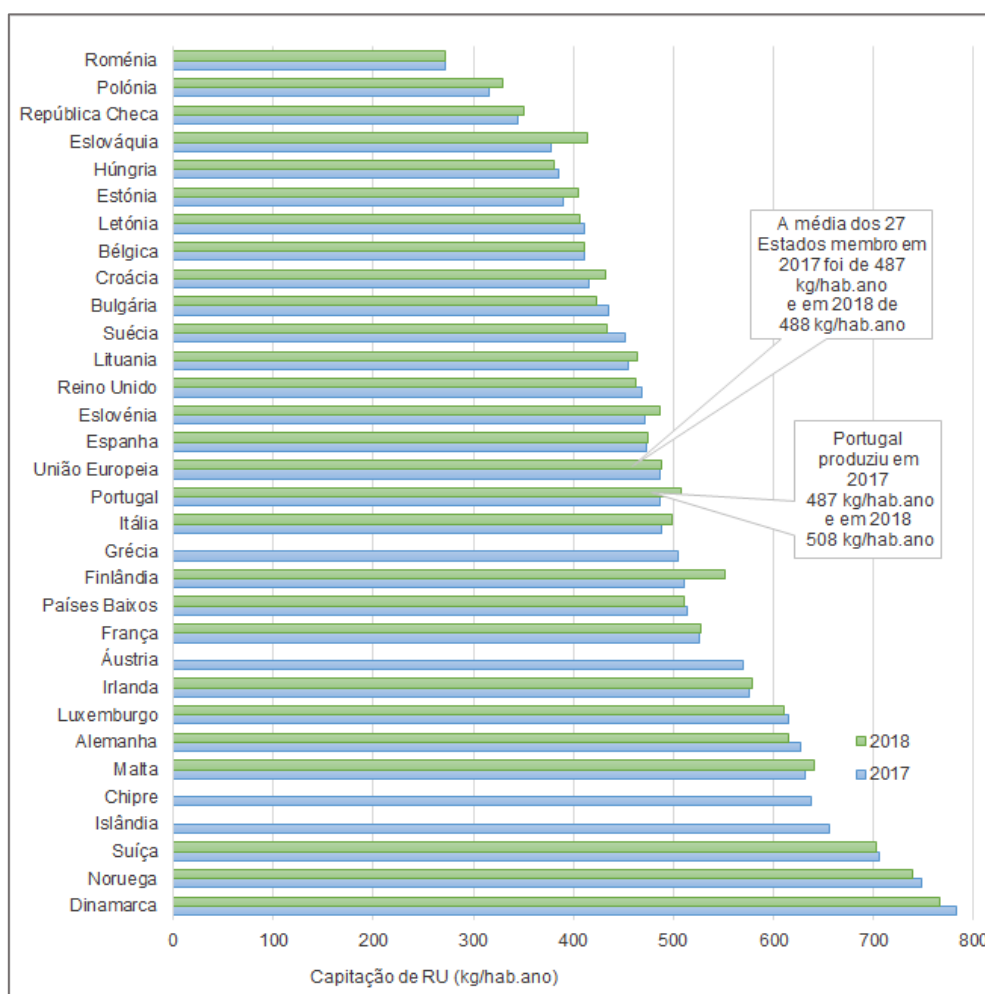


Figura 3.10 - Capitação de RU a nível europeu para o ano de 2017 e 2018. (Fonte: EUROSTAT, 2020a)

Ao nível da união europeia em 2019, o tipo de tratamento fornecido aos resíduos que mais foi utilizado foi a valorização material, seguida de valorização orgânica e por fim o aterro e outros (figura 3.11).

A Islândia, Irlanda, Grécia e o Chipre não reportaram estes dados à data da recolha da informação da base de dados.

A Polónia, o Reino Unido, os Países Baixos, a Itália, a Bélgica, a Alemanha e a Eslováquia continuam a eliminar os seus resíduos através de incineração sem aproveitamento energético.

A Espanha, foi o país que mais depositou em aterro (quantidade total de RU) constituindo 11 325 toneladas.

A nível europeu os países que mais utilizam a valorização energética como método de tratamento dos seus resíduos são ordenadamente: a Alemanha, a França e o Reino Unido. A Alemanha também é o país que mais resíduos encaminha para valorização orgânica e material a nível europeu e o que menos deposita em aterro.

Portugal continua a depositar mais em aterro quando comparando a outras formas de tratamento, no entanto, não possui como método de eliminação a incineração sem valorização energética.

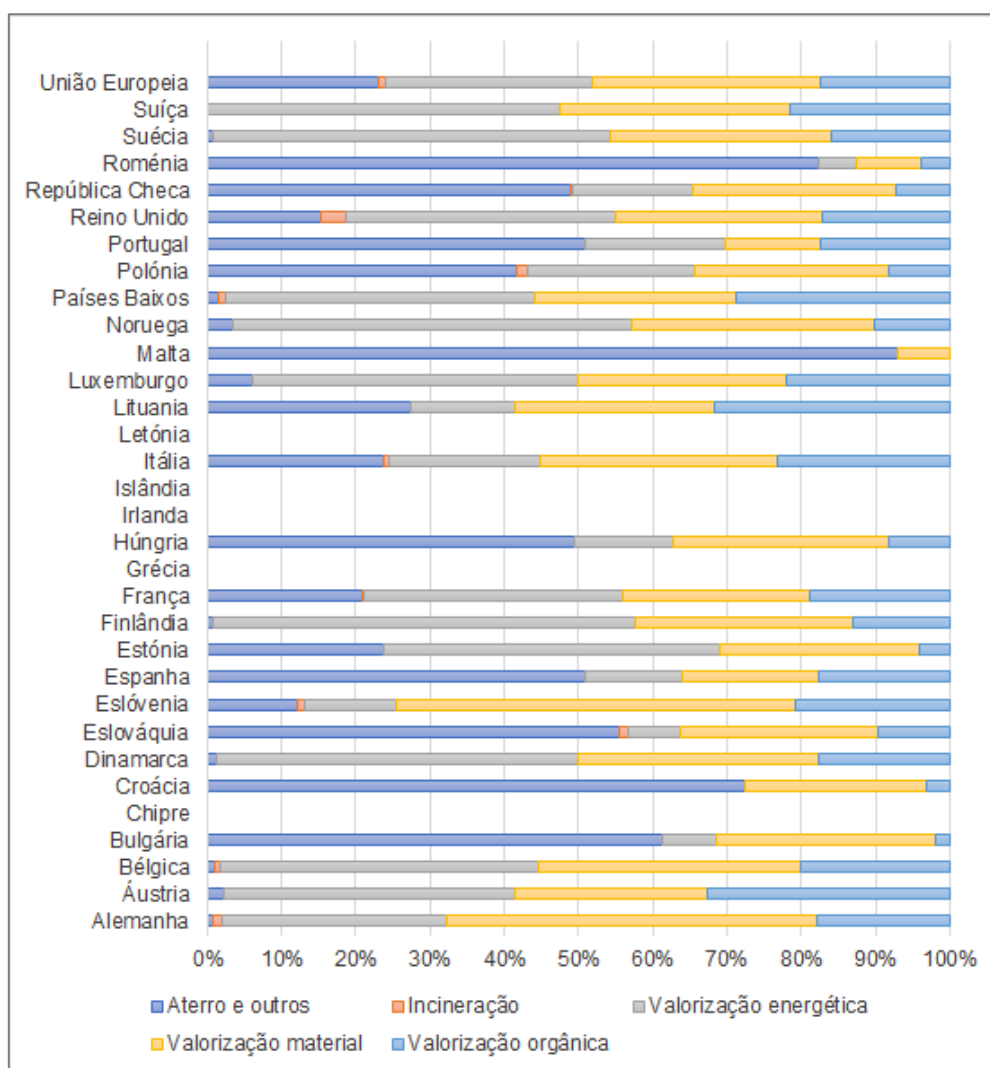


Figura 3.11 - Tratamento dos resíduos na EU em 2018 (Fonte: EUROSTAT, 2020b).

3.5. O composto produzido a partir de resíduos urbanos

Os resíduos depositados no caixote indiferenciado possuem como um dos métodos de aproveitamento dos seus nutrientes a valorização orgânica através do processo de compostagem ou de digestão anaeróbia.

Em Portugal Continental existem 10 unidades que efetuam a compostagem e 12 realizam a digestão anaeróbia e compostagem.

Após a recolha dos resíduos do caixote indiferenciado, estes são diretamente encaminhados para as TMB na qual são submetidos a um processo de triagem mecânica para remoção de pedras, plásticos e vidros.

Além da origem anteriormente descrita, os biorresíduos utilizados para a produção deste composto, podem ser ainda recolhidos seletivamente denominada de valorização orgânica seletiva.

A fração biológica fica a degradar (aeróbia ou anaerobiamente), sendo posteriormente encaminhada para pilhas e após diversos dias origina o composto orgânico maturado.

Atualmente, os biorresíduos utilizados para a produção do composto orgânico continuam a provir na grande maioria das unidades de TMB (figura 3.12), com perspectivas de mudança no setor até 2023 com a obrigatoriedade da recolha seletiva de biorresíduos em todos os sistemas.

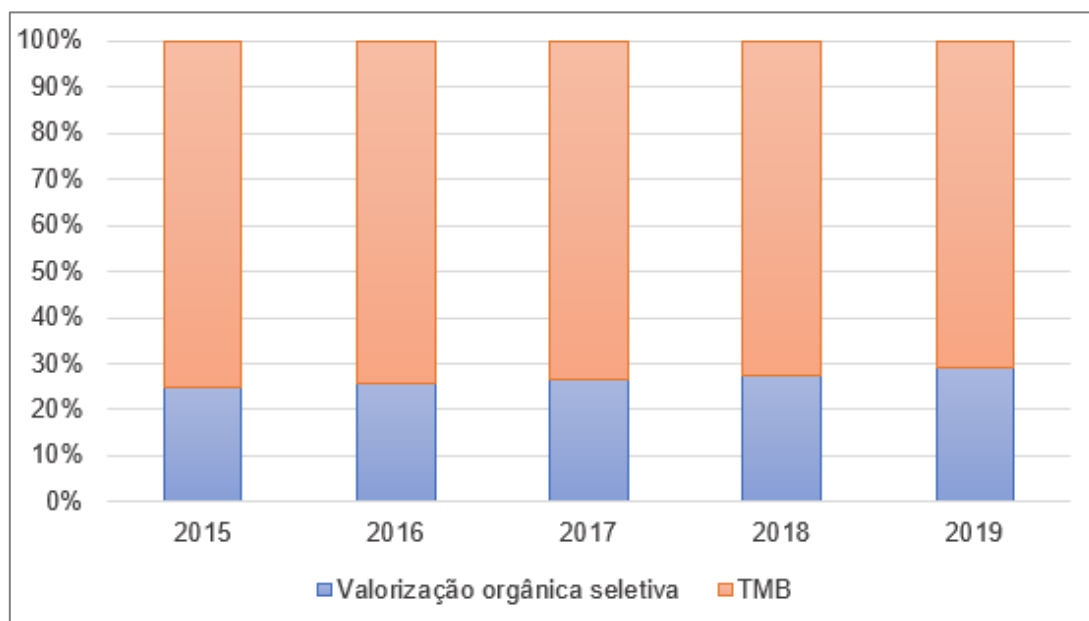


Figura 3.12 - Composto produzido por origem (Fonte: Adaptado de RARU, 2019).

Em 2019, produziu-se no total 53 750 t de composto com destino à agricultura nacional, menos do que nos anos anteriores como se pode observar na figura 3.13.

O PERSU 2020 prevê o aumento da capacidade da valorização orgânica na unidade da Resulima que receberá também resíduos biodegradáveis do sistema Valorminho.

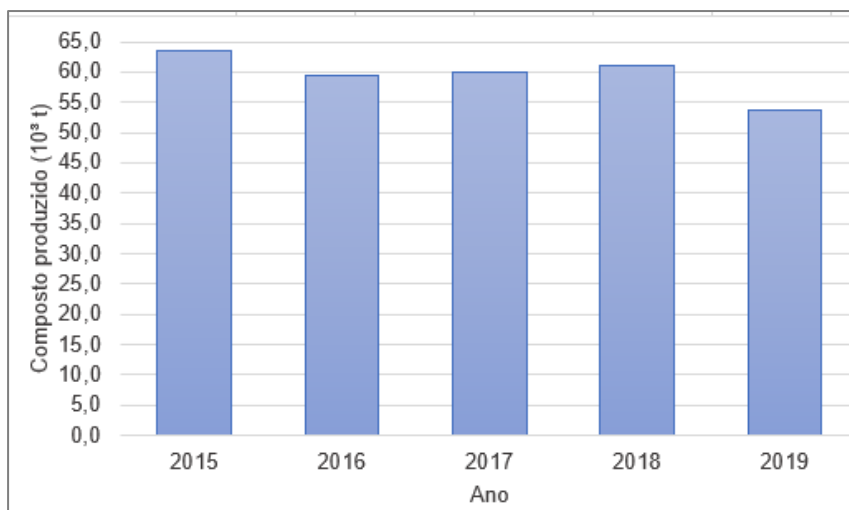


Figura 3.13 - Composto produzido em Portugal Continental. (Fonte: Adaptado de *RARU* 2019)

No entanto, mesmo após o processo de triagem continuam a ficar alguns contaminantes nos RU. Além dos antropogénicas, existem ainda micronutrientes que em quantidades elevadas podem ser prejudiciais ao crescimento das plantas, como é o caso do: Boro (B), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdénio (Mo) e o Zinco (Zn).

Os valores-limite estabelecidos para os metais pesados são mais rigorosos quando o composto se encontra em contacto direto com a cultura (Classe I e II), sendo mais flexível para culturas arbustivas ou arbóreas (Classe IIA).

Segundo o *RARU* de 2019, do total de composto com origem nos RU vendido em 2019, a maioria pertencia à classe IIA como se pode observar na figura 3.14.

Devido à presença desses materiais inertes (plástico, vidros e pedras) existem empresas que recusam comprar produtos de fornecedores que utilizam fertilizantes oriundos de RU constituindo um problema para o mercado de fertilizantes (Santiago, 2020).

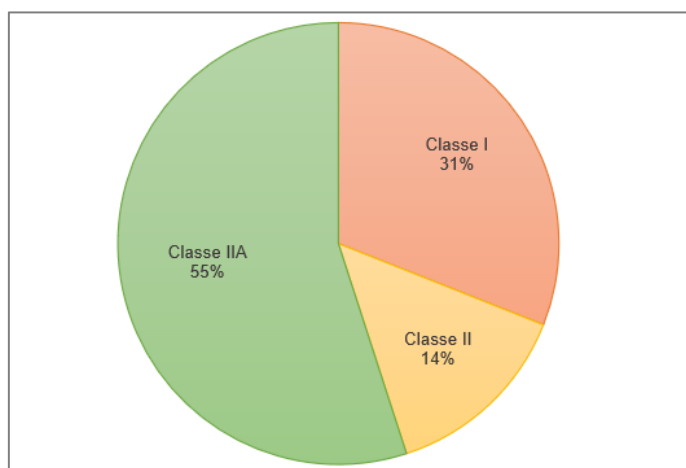


Figura 3.14 - Composto para a agricultura por classe (Fonte: Adaptado do *RARU* 2019).

3.6. O setor dos resíduos e a pandemia pelo COVID-19

Perante a perigosidade da transmissão do COVID-19, o setor dos resíduos ficou bastante condicionado. Para garantir a proteção da saúde pública, dos trabalhadores e prevenir a disseminação da doença pela transmissão do COVID-19, compatibilizando-a com a necessidade

de uma gestão eficaz e eficiente dos resíduos, o Ministério do Ambiente e da Ação Climática emitiu orientações relativas à gestão de resíduos.

Esta orientações visaram quer a Gestão de resíduos produzidos em empresas, hotéis e outros alojamentos, portos e aeroportos quer a Gestão de resíduos produzidos nos domicílios onde os sacos fechados deveriam ser colocados dentro de um 2º saco e depositado no contentor de resíduos indiferenciados, quer os Operadores de recolha e tratamento de resíduos, Operadores de tratamento de resíduos hospitalares, Municípios, ou Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos, conforme as responsabilidades definidas, para encaminhamento dos resíduos indiferenciados preferencialmente para incineração.

Também os resíduos de embalagens recolhidos seletivamente através dos ecopontos, serem submetidos a um período de armazenagem definido pela Direção Geral de Saúde, prévio ao seu processamento, na unidade de triagem, e os Operadores de gestão de resíduos deviam cumprir os seus planos de contingência, assegurar os serviços mínimos e, as necessárias medidas.

Devido a esta situação pandémica, a pretensão inicial de se efetuar o caso de estudo desta tese durante o processo de compostagem, com a mistura nas pilhas de composto das cinzas de fundo para análise durante a fermentação, na maturação e na estabilização foi impossível de realizar. Os planos de contingência adotadas pelas empresas, como a AMARSUL, impediu que este objetivo inicial se concretizasse por razões de saúde pública.

Perante esta impossibilidade optou-se por desenvolver a dissertação com base em ensaios laboratoriais e na revisão de literatura com informação técnica relacionada com o tema em avaliação. Assinale-se, todavia, que não existem evidências que apontem para a transmissão do SARS-CoV-2 através dos resíduos de origem doméstica.

• **Nas emissões atmosféricas**

Como nota relevante neste domínio, as medidas de isolamento postas em prática por governos em todo mundo para conter a propagação da pandemia de COVID-19 estão a ter um decréscimo no nível de poluição mundial e uma melhoria da qualidade do ar.

Os recentes dados *do Global Modeling and Data Assimilation Office* da NASA revelam uma diminuição drástica das emissões de compostos poluentes em países como a China, a Coreia do Sul, a Itália e a Índia.

Na Europa, as diferenças a nível de poluição atmosférica em Itália foram notórias, em linha com os dados satélite *Copernicus Sentinel-5P* que confirmam quebras do nível de dióxido de nitrogénio de 45-50% em comparação ao período homólogo do ano transato.

Em Portugal, as imagens do satélite Europeu *Copernicus Sentinel 5P* processadas pelos peritos do *AIR Centre* no início de abril de 2020 demonstraram também uma redução drástica nos níveis de dióxido de azoto (NO₂). No caso de Lisboa a redução foi mais significativa, chegando aos 80% em alguns locais da capital e, no Porto, a redução atingiu os 60%.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Compostagem

O Decreto-lei nº 103/2015 estabelece a definição de Compostagem como sendo: *“a degradação biológica aeróbia dos resíduos orgânicos até à sua estabilização, produzindo uma substância húmica, designada por composto, utilizável como corretivo orgânico do solo”*.

Segundo Haug (1993), o processo de compostagem é descrito *“como a decomposição biológica da matéria orgânica através de condições controladas de humidade e oxigenação, que permitem o desenvolvimento de microrganismos que através da libertação de calor que permitem atingir temperaturas termofílicas com o objetivo de obter um produto estabilizado, isento de sementes de plantas e patogénicos”*.

Segundo Epstein (2011), esta é uma forma de reciclagem da matéria orgânica descartada e passível de aplicação destes nutrientes nos solos agrícolas e florestais.

A Compostagem é assim um *“... processo de reciclagem da matéria orgânica presente nos resíduos. Trata-se de um processo aeróbio controlado, em que diversos microrganismos são responsáveis por transformações bioquímicas na massa de resíduos”*.

Relativamente ao processo de compostagem, existem quatro tipos principais:

1. *Compostagem simples em pilhas, com revolvimento mecânico em parque aberto e coberto;*
2. *Compostagem em pilhas estáticas com arejamento forçado;*
3. *Compostagem em túneis com arejamento forçado;*
4. *Compostagem em reatores com arejamento.*

De uma forma geral, o processo de compostagem pode acontecer por dois métodos:

- **Método natural:** *a fração orgânica dos resíduos é disposta em pilhas de formato variável. O arejamento necessário para o desenvolvimento do processo de decomposição biológica é conseguido por revolvimentos periódicos, com o auxílio de equipamento apropriado. O tempo para que o processo se complete varia de três a quatro meses.*
- **Método acelerado:** *o arejamento é forçado por sistemas de injeção de ar, tubos perfurados, sobre as quais se colocam as pilhas de resíduos, ou em danos rotativos, dentro dos quais são colocados os resíduos, avançando no sentido contrário à corrente de ar. Posteriormente, são dispostos em pilhas, como no método natural para maturação.*

Em qualquer sistema de compostagem deverão considerar-se quatro objetivos fundamentais:

- *Que o processo seja o mais rápido possível e com o menor consumo de energia;*
- *Ocupar o menor espaço possível;*
- *Menores custos de operação;*
- *Garantir um produto final com boas propriedades.*

Para alcançar parte destes objetivos é necessário criar as melhores condições no processo de compostagem.

Em seguida enumeram-se algumas vantagens e desvantagens do processo de compostagem em pilha revolvida:

Vantagens	Desvantagens
Diminuição da massa, da humidade e do volume dos resíduos criados (Cunha Queda, 1999 citado por Sequeira, 2013; Epstein, 2011).	Ocupação de uma maior área de terreno quando comparado com outras tecnologias.
Diminuição da quantidade de resíduos depositados em aterro ou incinerados.	A necessidade de triagem dos materiais incorporados no processo quando não existe recolha seletiva, encarece o processo (Piedade & Aguiar, 2010).
Potencial aplicação na agricultura através da reciclagem dos nutrientes como o azoto e o carbono (Epstein, 2011).	Monitorização das condições de humidade e oxigenação ao longo do processo de compostagem de modo a evitar mau cheiro e bioaerossóis (Epstein, 2011).
Adição de carbono ao solo e a melhoria do sequestro deste auxilia na redução de gases de efeitos de estufa (Epstein, 2011).	Não é isento de odores sendo a amónia um dos subprodutos que gera odor (Epstein, 2011).
A aplicação do composto diminui a erosão, aumenta a humidade, reduz o escoamento e melhora a infiltração nos solos (Epstein, 2011).	Redução de volume inferior à atingida por digestão anaeróbia (Penacho, 2016).
Boa aceitação social da tecnologia face a outras alternativas como a incineração ou deposição em aterro.	É um processo de compostagem lento quando comparando com outros processos (Cunha Queda, 1999 citado por Sequeira, 2013).
Criação de emprego para a manutenção dos circuitos de compostagem.	
Compostos emergentes e microrganismos patogénicos podem ser eliminados (Cunha Queda, 1999 citado por Sequeira, 2013; Epstein, 2011).	
Os produtos da compostagem são limpos e seguros para utilizar dando origem a um corretivo orgânico (Cunha Queda, 1999 citado por Sequeira, 2013; Epstein, 2011).	

4.1.1. Parâmetros a controlar durante processo de compostagem

Os microrganismos responsáveis pela decomposição do carbono na compostagem são classificados como aeróbios quando a reação de oxidação/redução do carbono ocorre na presença de oxigénio resultando num aumento de temperatura, produção de água e de dióxido de carbono (figura 4.1).

Na degradação da matéria orgânica as bactérias possuem um papel fundamental sendo os principais microrganismos, como as bactérias, fungos e protozoários responsáveis pela decomposição da matéria carbonácea (Epstein, 2011).

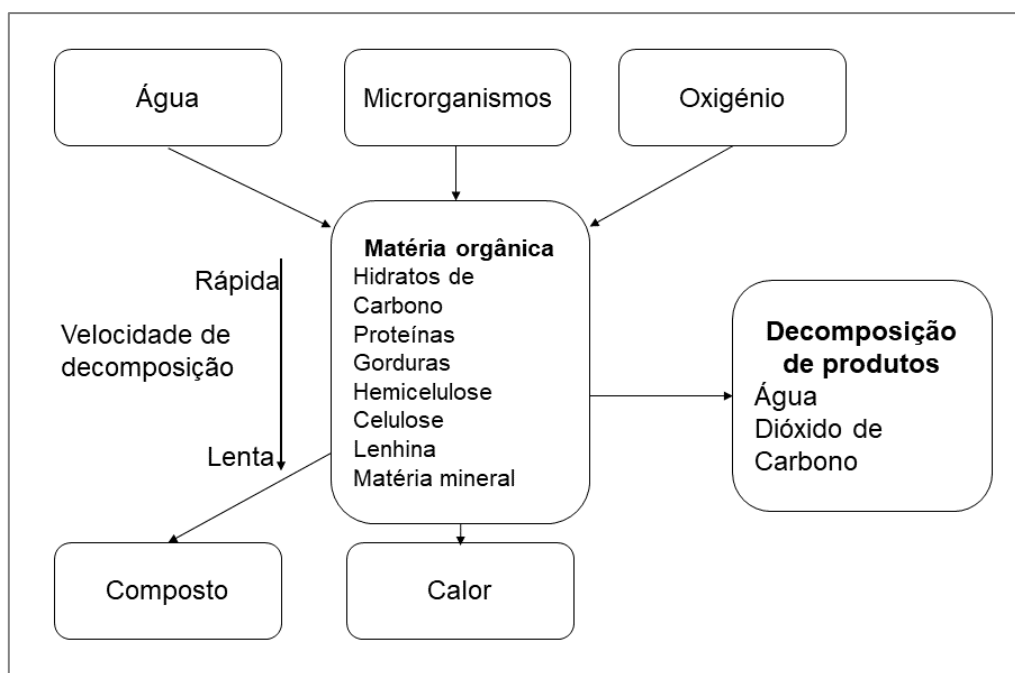


Figura 4.1 - O processo de compostagem (Adaptado de Epstein, 2011)

Os fungos competem diretamente com as bactérias por nutrientes na compostagem, porque não necessitam de tanto azoto, conseguem sobreviver numa gama abrangente de pH e extraem facilmente a humidade (Haug, 1993).

Deste modo, para o processo de compostagem ser eficiente deve assegurar colónias mistas de bactérias, fungos e actinomicetas (Haug, 1993), procurando a eliminação de protozoários, cistos e vírus de modo a minimizar doenças causadas por estes (Epstein, 2011).

A quantidade de C/N que os microrganismos necessitam para a sua atividade enzimática durante o processo de compostagem varia entre 25 a 30 partes de carbono para 1 de azoto dependendo do substrato utilizado para a compostagem (Azim *et al.*, 2018; Epstein, 1997), ou para melhor controlar o processo de compostagem a nível industrial 40 partes de carbono para 1 de azoto (Epstein, 2011).

A alimentação do oxigénio constitui um parâmetro a ter em atenção durante a compostagem, variando entre: natural ou forçada. Epstein (2011) estimou que a quantidade de oxigénio a fornecer aos microrganismos para manter boas condições aeróbias, quando o composto tem como substrato biorresíduos e madeira é de 75 a 129 m³.h/t m.s.

A humidade influencia a taxa de decomposição dos resíduos durante o processo de compostagem, pois condiciona a atividade microbiológica. Humidade abaixo 40% limita a atividade, porém, acima de 60% os poros encontram-se preenchidos com água diminuindo a quantidade de espaços presentes na matriz e consequentemente cria condições anaeróbias (Epstein, 1997; Epstein, 2011). Devido às temperaturas atingidas durante o processo de

compostagem serem altas, este parâmetro sofre alterações ao longo do processo, sendo sempre que necessário pulverizar a pilha com água de modo a manter a humidade estável.

A temperatura é utilizada como indicador da atividade microbiológica, pois esta influencia a taxa de decomposição do substrato (Epstein, 2011) e também, a sucessão de colónias de microrganismos presentes no composto. A temperatura do composto é função da taxa metabólica estimando-se que em média a taxa metabólica duplica quando aumenta 10°C de temperatura (Haug, 1993).

4.1.2. A cinética do processo de compostagem

Na figura 4.2, é apresentada a cinética do processo de compostagem e a descrição de cada fase.

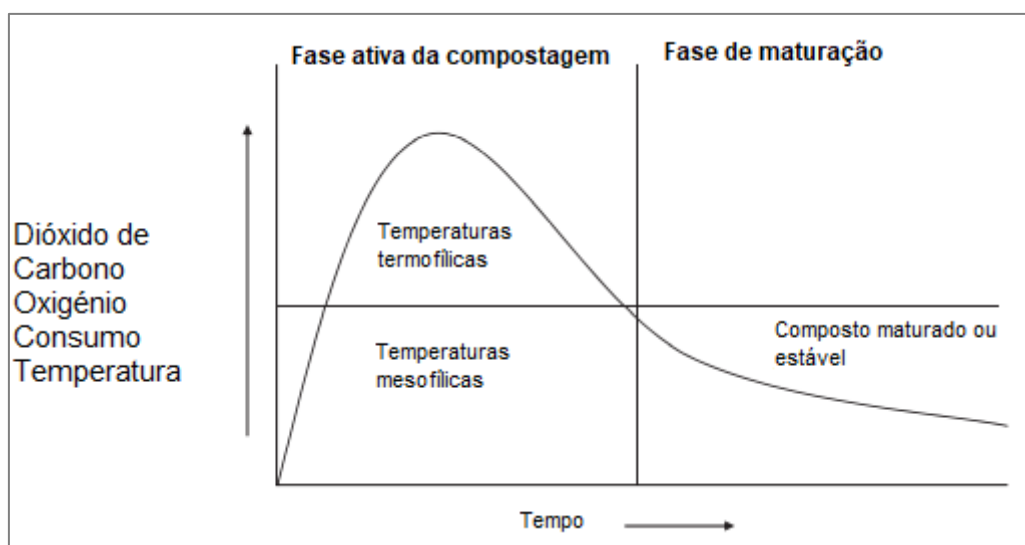


Figura 4.2 - Fases do processo de compostagem (Adaptado de Epstein, 2011).

A progressão da temperatura até aos 40°C constitui a fase mesofílica inicial, em que existe um período de latência, havendo posteriormente um crescimento elevado dos microrganismos (Epstein, 1997). Durante esta fase ocorre a degradação da matéria orgânica mais facilmente biodegradável como os açúcares e as proteínas em ácidos orgânicos, dióxido de carbono e calor (Epstein, 2011).

A produção destes ácidos orgânicos diminui o pH, que se estabelece na gama dos 4,5 aos 5,5 (Aguiar & Piedade, 2010). Nesta fase há uma rápida decomposição da matéria orgânica maioritariamente por fungos e bactérias (Insam & Bertoldi, 2007 como citado por Pinto, 2013).

A fase termofílica caracteriza-se por temperaturas na ordem dos 50°C aos 60°C, onde ocorre uma sucessão de microrganismos, maioritariamente fungos e actinomicetas (Silveira, 1987). Durante esta fase, ocorre a hidrólise das proteínas e do azoto orgânico levando à libertação da amónia e um consequente aumento do pH (Poincelot, 1972).

Devido ao aumento da temperatura o oxigénio disponível diminuiu assim como a humidade, deste modo, existe um condicionamento dos microrganismos na pilha levando à esterilização do composto através da destruição de sementes infestantes (Pinto, 2013).

Segundo Azim *et al.* (2018), estima-se que temperatura ideal para obter uma boa qualidade de composto, se encontre entre os 60 °C e os 70°C, pois abaixo dos 60 °C existe um abrandamento da velocidade de decomposição e acima desta apenas as enzimas previamente libertadas continuam a degradação da matéria orgânica.

De acordo com Epstein em 2011, a temperatura do composto deve-se manter acima dos 55°C durante diversos dias para destruir organismos patogénicos, no entanto, em resíduos alimentares processados a estabilização é atingida mais rapidamente entre os 45°C e os 55°C, procurando-se manter a temperatura abaixo dos 60°C em instalações abertas para evitar a libertação de odores desagradáveis.

A fase mesofílica final também é denominada de fase de arrefecimento, fase de maturação ou de estabilidade do produto. A população que coloniza o composto é constituída por fungos e actinomicetas (Epstein, 1997) e estas conseguem degradar a celulose, a quitina e a hemicelulose (Insam & Bertoldi, 2007 citando Pinto, 2013).

Durante esta fase as reações são mais lentas, sendo estas de polimerização e condensação que levam à formação de ácidos húmicos (Azim *et al.*, 2018).

Devido à incorporação do azoto nos ácidos húmicos estes tornam-se difíceis de degradar existindo uma redução das substâncias fitotóxicas presentes no composto (Shaffer, 2010 como citado por Azim *et al.*, 2018; Pinto, 2013).

Há um abrandamento da atividade microbiológica, resultante do esgotamento do substrato e do abrandamento da velocidade das reações que se traduz numa diminuição da temperatura (Martinho *et al.*, 2011; Pinto, 2013), constituindo a fase final da compostagem.

Na fase de estabilização, o pH deverá encontrar-se próximo do neutro devido ao efeito tampão causado pela presença do húmus (Azim *et al.*, 2018; Poincelot, 1972). O composto passa a ser considerado maturado quando:

- *após ser remexido encontrar-se à temperatura ambiente*
- *durante o armazenamento não fica anaeróbio e,*
- *quando aplicado aos solos não existe assimilação de azoto.*

4.1.3. Avaliação da qualidade final do composto

A avaliação da qualidade final de um composto de RU processa-se através de diversos parâmetros, sendo alguns destes relacionáveis em termos empíricos, nomeadamente; *o composto que atingiu devidamente o seu grau de maturação não deverá emitir odor a amónia, a temperatura do composto deve-se manter estável e à temperatura ambiente, deve ser granular, escuro e com um odor agradável e deve ser distinguível independentemente do material.*

4.1.4. O grau de maturação e a estabilidade do composto

O grau de maturação possui duas diferentes abordagens: a primeira baseada em que a estabilidade deste é estimada através da biodegradabilidade dos materiais orgânicos e a presença de húmus (Bernal *et al.*, 1998; Chen, 2003; Grigatti, 2004; Castaldi *et al.*, 2005; Adani

et al., 2006 como citado por Azim et al., 2018) e a segunda na ausência de ácidos orgânicos fitotóxicos no composto (Azim et al., 2018; Epstein, 1997; Epstein, 2011).

No entanto, sendo difícil a avaliação do grau de maturação, a avaliação deste parâmetro deve incluir pelos menos dois dos seguintes parâmetros: carbono orgânico total (COT), relação C/N, testes de respiração, carbono orgânico total na fração dos ácidos fúlvicos e a solubilidade do azoto em água (orgânico e total) (Bernal et al., 2009 e Eggen & Vethe, 2001 como citado por Jiménez & Garcia, 1992).

A fitotoxicidade de um composto refere-se a qualquer substância (orgânica ou inorgânica) que é tóxica para as plantas, sendo que esta se encontra associada à produção de ácidos gordos. As substâncias tóxicas podem ser distinguidas através de parâmetros como: a salinidade, a presença de químicos inorgânicos como os metais pesados, à alta produção de amónia e de dióxido de carbono (Epstein, 2011).

Um produto que é considerado instável está associado a uma alta taxa de decomposição de nutrientes por parte dos microrganismos, que consequentemente consomem o azoto presente nos solos necessário ao crescimento das plantas (Epstein, 1997).

Segundo Epstein em 1997, quando um composto instável é adicionado ao solo, com uma elevada taxa de C/N os microrganismos competem com as plantas por estes nutrientes. Nestes casos plantas exibem um tom amarelo como resultado da deficiência de azoto (clorose). No entanto, quando esta relação é baixa existe a libertação de amónia que leva à formação de elementos fitotóxicos.

A diminuição de oxigénio nos solos afeta as espécies microbiológicas presentes, assim como o crescimento das plantas, deste modo, algumas espécies químicas como os metais pesados solubilizam-se e a taxa de consumo de nutrientes altera-se (Epstein, 1997).

A maioria dos testes de maturação permitem estimar a biodegradabilidade e a quantidade de carbono que ainda pode ser mineralizado (Oliveira, 2010). Para a avaliação da estabilidade do composto através da atividade microbiológica as metodologias aplicadas são:

- *O teste do auto-aquecimento, na qual o composto é colocado num vaso DEWAR e é medida a temperatura máxima atingida na presença de oxigénio.*
- *A medição da atividade enzimática.*
- *O teste da Solvita® que se baseia na mineralização do carbono e na volatilização da amónia durante o processo de compostagem com a humidade ajustada ao nível ideal.*
- *A sucessão de populações nemátodes (Steel et al., 2010 citado por Azim et al., 2018).*
- *E testes de respiração através da medição do dióxido de carbono formado pelas populações microbiológicas.*

Segundo Woods End (2000) citando Oliveira (2010), cada classe de estabilidade possui uma classe de plantas mais adequada para ser empregue, sendo estas:

Classe I- *Material para a compostagem pode ser utilizado na produção de cogumelos.*

Classe II- *Culturas sachadas em geral ou culturas de cama quente.*

Classe III- Árvores de fruta.

Classe IV- Aplicação em jardinagem e em estufas.

Classe V- Plantas em vaso e como substrato para germinar plantas.

4.1.5. A massa volúmica aparente e a granulometria

A massa volúmica aparente é considerada a quantidade de massa de um dado material que se encontra contida num dado volume. Este parâmetro varia entre os 500 kg/m³ a 900 kg/m³ influenciando outras propriedades do composto como a porosidade, a facilidade de compactação e a coesão.

Quanto maior for a massa volúmica aparente menor será a porosidade e o volume de ar presente, no entanto, baixa massa volúmica pode indicar excesso de ar e consequentemente uma menor disponibilidade de água (Nappi & Barberis, 1993 como citado por Azim *et al.*, 2018).

A porosidade é definida como a quantidade de espaços que contêm ar, sendo importante na manutenção de condições aeróbias do processo (Epstein, 2011), pois se a dimensão destas partículas for demasiado pequena existe a tendência para a compactação (Piedade & Aguiar, 2010). Quando o processo implementado é em pilha revolvida, o revolvimento permite controlar a porosidade permitindo a eliminação de caminhos preferenciais e minimizando zonas anaeróbias (Martinho *et al.*, 2011).

A granulometria do material possui uma grande influência na cinética do processo, sendo um fator muito importante para melhorar a área de contacto dos resíduos com os microrganismos (Piedade & Aguiar, 2010). Os resíduos urbanos são densos e possuem muita humidade, sendo muitas vezes adicionados, agentes estruturantes como a madeira, de modo a equilibrar o conteúdo de húmico e a harmonizar a estrutura (Epstein, 2011).

A maioria das instalações possui uma parte inicial responsável por quebrar e homogeneizar as partículas de maior dimensão do composto. O composto utilizado como adubo pode ter partículas de grande dimensão, no entanto não se aconselha se a aplicação for em relvados, céspedes ou para turfa (Epstein, 2011).

4.1.6. O pH

O pH nos solos afeta a disponibilidade de nutrientes, quando este é acima de 6,5, elementos como o ferro, o manganês e o zinco tornam-se menos disponíveis, ao passo que o molibdénio e o fósforo tornam-se mais disponíveis (Jordão *et al.*, 2006).

Quando um solo é considerado ácido, minerais como o zinco, o alumínio, o manganês, o cobre e o cobalto tornam-se mais facilmente consumíveis pelas plantas, podendo ser em certas quantidades tóxicos (Bougnom *et al.*, 2010).

Os solos alcalinos possuem uma grande quantidade de iões de bicarbonato o que interfere com a taxa de absorção de outros iões danificando as plantas. Quando o pH aumenta, há uma diminuição da disponibilidade de zinco (Shuman & Li, 1996 como citado por Jordão *et al.*, 2006) e do cobre (Andrade *et al.*, 1975 como citado por Jordão *et al.*, 2006) estimando-se que o

aumento de uma unidade de pH do solo constitui 100 vezes mais a solubilização deste elemento (Mortvedt *et al.*, 1991 como citado por Jordão *et al.*, 2006).

O pH foi um dos primeiros parâmetros químicos indicadores da maturação, tendo sido estudado por Avnimelech *et al.* em 1996, citando Azim *et al.* (2018), este parâmetro deve-se encontrar na gama das 7 a 9 unidades.

4.1.7. Condutividade elétrica

A CE do composto é influenciada pela presença de iões como o sódio, o potássio, o cálcio, o magnésio, o cloro e os sulfatos. Os níveis destes elementos no solo inibem o crescimento da planta, pois, ocorre o aumento da pressão osmótica que diminui a disponibilidade de água para a planta (Azim *et al.*, 2018). A sensibilidade aos sais presentes nos solos depende do tipo de cultura e da tolerância da planta à presença de sais. Segundo Epstein em 1997, a CE acima de 5 mS/cm pode resultar em elementos fitotóxicos.

Tabela 4.1 - O efeito da salinidade nas culturas. (Adaptado de Epstein 2011)

Condutividade elétrica a 25 °C (mS/cm)	Efeitos nas culturas
0 a 2	Efeitos negligenciáveis
2 a 4	Culturas sensíveis são afetadas
4 a 8	A maioria das culturas são afetadas
8 a 16	Culturas tolerantes à salinidade
Acima de 16	Apenas algumas culturas tolerantes

Também a natureza do material utilizado na compostagem influencia este parâmetro, para composto de RU a CE oscila entre 7 a 12 mS/cm (Epstein, 2011; Villar *et al.*, 1993). Quando o composto possui elementos inertes na sua composição como pedras, plástico, vidro, entre outros, este parâmetro irá variar entre 3,88 mS/cm (Hanay *et al.*, 2004 como citado por Epstein, 2011) a 12 mS/cm (Epstein, 2011).

No entanto, a maioria dos resíduos caracterizam-se por possuírem alguns materiais inertes e biosólidos registrando uma condutividade na ordem dos 6,7 mS/cm (Ozores-Hampton *et al.*, 2002 como citado por Epstein, 2011).

4.1.8. A matéria orgânica, sólidos voláteis ou matéria volátil

A matéria orgânica é definida como tendo na sua composição compostos de alto peso molecular como os polissacarídeos e as proteínas, possuindo ainda açúcares, aminoácidos, compostos azotados e substâncias húmicas (Epstein, 1997; Epstein, 2011). Devido ao processo de compostagem a maioria dos açúcares, proteínas e aminoácidos já foram metabolizados, sendo que no composto final maioritariamente resultam os ácidos húmicos (Epstein, 1997).

A análise deste parâmetro através da perda de massa por ignição, constitui uma análise simples de realizar, baseando-se no princípio de que a matéria volatilizada pela temperatura da mufla constitui a matéria orgânica presente naquele composto. Foi demonstrado que uma temperatura

demasiado alta pode sobrestimar este valor, sendo que uma temperatura baixa, não volatiliza toda a matéria orgânica na amostra (Matthiessen *et al.*, 2005).

Para medir este parâmetro em compostos é aconselhada a temperatura de 550°C durante 4h, tendo-se concluído que não existem diferenças significativas neste parâmetro para temperaturas até aos 650°C ou no tempo que a amostra permanece na mufla (Matthiessen *et al.*, 2005).

Esta análise foi realizada utilizando uma mufla com a temperatura de 550°C durante 2h, no entanto, o composto possui a desvantagem de materiais como o plástico poderem ser contabilizados como matéria orgânica, sendo recomendado retirar estes antes da análise (Kurola *et al.*, 2011).

Quando a matéria orgânica é adicionada aos solos existe um aumento da capacidade de troca catiónica nas raízes das plantas. Aumenta a capacidade de retenção de metais nocivos, aumentando assim o poder tampão para a salinização, armazenando o CO₂ atmosférico e fornecendo alguns nutrientes como o azoto, o fósforo, o enxofre entre outros (Azim *et al.*, 2018).

Foi demonstrado que a presença de ácidos húmicos nos solos e no composto constituem uma fração importante da matéria orgânica para que o cobre seja ligado às formas insolúveis e influencia a solubilidade do alumínio (Ifansyah, 2013 como citado por Asquer *et al.*, 2017;).

4.2. Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia consiste num processo em que os resíduos orgânicos sofrem um processo de degradação biológica por ação de microrganismos anaeróbios, na ausência de oxigénio.

É um processo de valorização da fração orgânica dos resíduos, que ocorre em reatores fechados na qual resultam dois produtos, lama digerida e o biogás (Levy & Cabeças, 2006 e Castanheira *et al.*, 2004 como citado por Penacho, 2013).

Um dos principais produtos que resultam deste tipo de tratamento de resíduos, o metano, é um gás com elevado potencial energético.

Em termos genéricos este tratamento biológico observa as seguintes etapas:

- *Preparação do substrato biodegradável, em Pulpers (etapa exclusiva da via húmida).*
- *Biometanização em digestores anaeróbios.*
- *Desidratação em prensas e/ou centrífugas do material digerido proveniente da metanização*
- *Compostagem em ambiente fechado (túneis) do material desidratado, com arejamento forçado.*
- *Maturação e estabilização biológica do material compostado, em parque aberto, mas coberto, obtendo-se o respetivo composto orgânico estabilizado.*
- *Afinação do composto onde este é sujeito à operação de crivagem para remoção de materiais inertes, vidros, plásticos e outros ainda remanescentes.*

Na digestão anaeróbia o processo de degradação ocorre por ação combinada de diferentes populações de microrganismos segundo três etapas principais:

- **Hidrólise e acidogénese** - são as duas primeiras etapas do processo, ocorrendo a hidrólise da matéria complexa em compostos mais simples.
- **Acetogénese** - nesta etapa as bactérias acetogénicas são responsáveis pela decomposição dos produtos da acidogénese. Os produtos que resultam desta etapa são acetato, hidrogénio e CO_2 .
- **Metanogénese** - as bactérias metanogénicas concretizam a fase final do processo convertendo o ácido acético, o hidrogénio e o CO_2 em metano.

Neste processo, parte da matéria biodegradável é transformada em biogás, essencialmente constituído por metano e dióxido de carbono (figura 4.3), lama digerida na produção de composto com possível valor comercial.

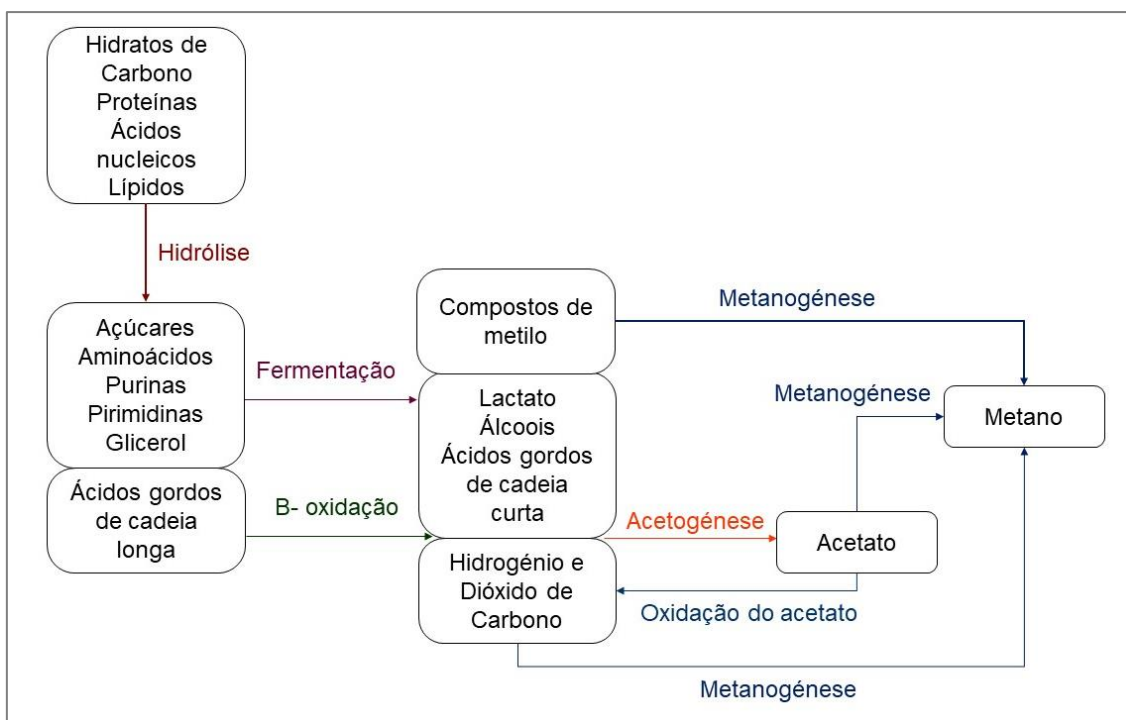


Figura 4.3 - As fases da digestão anaeróbia e os produtos formados (Fonte: Adaptado de Sousa, 2006 e Isam *et al.*, 2016 citando Martinho *et al.*, 2011)

No processo de digestão anaeróbia gera-se o biogás, constituído fundamentalmente por metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico (com um odor desagradável) entre outros.

O biogás produzido no processo de digestão anaeróbia, sofre purificação, desumidificação e armazenamento em gasómetro com o objetivo de estabilizar em qualidade e quantidade assegurando assim uma alimentação regular à central de valorização energética acoplada.

A produção de biogás depende de vários fatores como a composição do substrato, tamanho das partículas, proporção de compostos existentes, degradabilidade da matéria e relação entre os nutrientes essenciais (Penacho, 2016).

Outras variáveis a considerar de modo a manter o processo estável, são: a temperatura, o pH, a relação C/N, a velocidade das etapas de processo, o tempo de retenção hidráulico e dos sólidos, a carga orgânica, o grau de mistura e a presença de substâncias tóxicas ou xenobióticos para

os microrganismos (Levy & Cabeças, 2006 como citado por Penacho, 2013). O digerido resultante da digestão anaeróbia encontra-se maioritariamente com lignina, no entanto, este apresenta uma elevada humidade e fitotoxicidade (Abdullah *et al.*, 2008 como citado por Vassilev *et al.*, 2015), sendo necessário recorrer posteriormente à pós-compostagem do digerido para que ocorra a humificação. Neste processo em que há produção de biogás, cada tonelada de resíduo pode gerar entre 100 a 150 kWh/t de energia (Hartmann & Ahring, 2006 como citado por Martinho *et al.*, 2011).

4.3. A energia gerada a partir da biomassa

Entende-se por biomassa os produtos e subprodutos da floresta, resíduos da indústria da madeira, culturas agrícolas, efluentes domésticos de agropecuárias, agroalimentares e dos resíduos sólidos urbanos. A utilização da energia a partir da biomassa constitui uma alternativa à combustão de combustíveis fósseis, no entanto, como qualquer outra forma de produção de energia possui vantagens e desvantagens associadas como se encontra de seguida (COGEN Europe, 2020; Vassilev *et al.*, 2010; Vassilev *et al.*, 2015).

Vantagens:	Desvantagens:
Forma de energia renovável que permite o cumprimento de metas a nível da energia, Elevada disponibilidade do recurso a nível nacional, Contributo para a diminuição dos fogos florestais, Quando há cogeração a eficiência aumenta em mais de 40%, A combustão completa de biomassa permite diminuir as emissões de CO₂, quando comparando com o carvão. Quando tem cogeração há a diminuição de emissões de CO₂ na Europa em cerca de 200 milhões de toneladas. Reduz a dependência de importação de energia. Gera emprego.	Poder Calorífico Inferior de baixa densidade energética (<i>propriedade que define a qualidade da biomassa, pois resume as características químicas, as condições de humidade e a quantidade de calor do produto final numa única variável</i>) quando comparado com a do carvão, A eficiência do processo de combustão depende de fatores como o teor de humidade, a presença de elementos como o cloro, o potássio, o sódio e as cinzas de fundo, Questões relacionadas com a sustentabilidade do recurso, quando é feita a análise do ciclo de vida, A quantidade de cinzas de fundo produzidas é elevada, a que acresce a deposição obrigatória em aterros industriais com elevado custo associado. Variabilidade na composição das cinzas de fundo de biomassa. Custos elevados associados à produção, à extração, ao transporte e ao pré-tratamento da matéria-prima (a biomassa). Escassez ou aumento do custo da matéria prima devido aos incêndios florestais

Em Portugal existe uma elevada disponibilidade do recurso, que pode ser colocada em causa devido aos incêndios florestais. Segundo a PORDATA, em 2018 o total de área ardida em Portugal continental constituiu os 44 578 ha.

As associações de produtores de biomassa manifestado preocupações quanto à falta de matéria-prima para o setor e a possibilidade de aumento do valor do recurso (Cabrita-Mendes, 2020). Em causa encontra-se a falta de disponibilidade do recurso para utilização doméstica e industrial, podendo aumentar temporariamente o custo da matéria-prima (Mendes, 2019).

No entanto, as políticas têm funcionado no sentido de mitigar os fogos florestais através da utilização desta matéria-prima como combustível nas centrais de biomassa. A implementação de centrais próximas de zonas florestais tem vindo a ser privilegiadas com o intuito de mitigar impactes negativos e os custos associados ao transporte e à recolha da matéria-prima.

O aproveitamento de energia a partir de biomassa pode ter diversos métodos de conversão termoquímica entre os quais: a combustão, a co-combustão, a cogeração, a pirólise e a gaseificação.

4.3.1. Origem da biomassa

Tendo em consideração que os grupos de biomassa possuem características idênticas entre eles e, por isso, a necessidade de serem organizados para um melhor conhecimento da sua composição, Encontram-se de seguida representados, segundo Vassilev *et al.* (2010), os grupos de biomassa e algumas das variedades a que esta corresponde:

- **Madeira e biomassa proveniente de madeira:** Briquetes, cascas, folhagem, galhos, material de serralharia, pellets e ramos;
- **Biomassa de agricultura e ervas:** Alimentos- Bagaço, bolos originados em produção, cascas, caroços, culturas forrageiras, ervas, espigas, flores, frutas, folhas, grãos, palha, polpas e talos;
- **Biomassa aquática:** Algas marinhas, algas de água doce, macroalgas, microalgas, kelp e ervas de lagos, ervas marinhas e jacinto de água;
- **Biomassa humana e animal:** Farinha de ossos e carne, restos de animais de indústrias alimentares e ossos;
- **Biomassa contaminada e resíduos de biomassa contaminada:** Aparas de madeira, indústria do papel (Polpa de papel), madeira de resíduos de demolição, material proveniente de carris, paletes de madeira e caixas, produtos derivados da indústria dos combustíveis, resíduos provenientes de águas residuais, resíduos de cerâmica, resíduos de papel, resíduos hospitalares e resíduos sólidos municipais;
- **Misturas das biomassas mencionadas acima.**

Vassilev *et al.* (2010) reuniu informação relativa à composição da biomassa, pois esta depende de características como:

- **O desenvolvimento da biomassa:** o tipo de planta as características intrínsecas da planta, tal como a taxa de extração de água e nutrientes do solo e do ar bem como a

acumulação destes nos tecidos da planta. A metodologia de crescimento da planta como a disponibilidade da luz solar, o tipo de planta, a disponibilidade hídrica, o pH, nutrientes e a idade da planta, a utilização de pesticidas.

- **A localização:** Área geográfica, o clima, as estações do ano, o tipo de solo, a água, o pH do solo, nutrientes e a proximidade com o mar ou a distância de áreas poluídas.
- **As características do processo de recolha da biomassa:** A altura da colheita, a forma como esta foi recolhida a biomassa (pois pode haver a adição de pó, solo ou sujidade durante a colheita), no manuseamento, no transporte e no método de mistura das diferentes biomassas.

Acresce que a matéria orgânica presente na biomassa constitui cerca de 93% em base seca possuindo características relacionadas com celulose, hemicelulose, lignina, oxalatos e opala (Vassilev *et al.*, 2013).

4.3.2. A tecnologia para a combustão da biomassa e os resíduos produzidos

A combustão consiste na oxidação termoquímica com temperaturas na ordem dos 800°C aos 1000°C, da matéria orgânica presente na biomassa, com o oxigénio como comburente (agente oxidante) em energia calorífica, CO₂, vapor de água e cinzas de fundo (Oliveira, 2010). Algumas das tecnologias que utilizam a combustão são o fogão, a caldeira e os fornos.

A tecnologia de combustão permite o aproveitamento térmico e/ou elétrico quer a nível doméstico como a nível industrial. A combustão constitui uma reação de oxidação-redução na qual há um combustível (madeira, carvão, metano) e um comburente (oxigénio puro, ar), na qual os produtos desta combustão variam se a reação que ocorre é completa ou incompleta.

A tecnologia implementada na combustão da biomassa influencia a composição final se existir uma combustão incompleta pois haverá formação de produtos como: o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄), alguns compostos orgânicos voláteis (COV), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), partículas de diversas dimensões (PM_x), ozono (O₃), amónia (NH₃) e metais pesados (Fernandes, 2015). Outros fatores que influenciam as impurezas presentes nos gases formados são: as condições operacionais inadequadas, baixas temperaturas e a etapa do processo (Loo & Koppejan, 2008 e Galrborg, 2007 como citado por Fernandes, 2015). Sistemas como os filtros de mangas, os precipitadores eletrostáticos, os lavadores e os ciclones são implementados para reduzir a emissão de poluentes para a atmosfera (Quaak *et al.*, 1999 como citado por Fernandes, 2015).

Na generalidade das centrais de biomassa ocorrem ambas as reações em simultâneo, logo há formação de produtos como a água, o oxigénio, o azoto, bem como, diversos poluentes atmosféricos como o CO₂, CO, CH₄, sulfatos, ácido clorídrico, entre outros (Fernandes, 2015). Alguns elementos como o azoto, o cloro, o sódio, o potássio, formam componentes responsáveis pela corrosão e que se depositam nos equipamentos (Fernandes, 2015).

As centrais termoelétricas que se encontram equipadas com caldeira possuem dois tipos de cinzas de fundo as que provêm do fundo da caldeira (cinzas de fundo ou escórias) e as cinzas volantes que são extraídas da fase de depuração das emissões.

As cinzas volantes constituem a fração das partículas que foram volatilizadas que são recolhidas nos sobreaquecedores e nos economizadores. As cinzas volantes que são captadas no ciclone são partículas finas, maioritariamente inorgânicas, estas são transportadas pelo gás de combustão e precipitam na zona de combustão secundária, na caldeira e nos multiciclones (Sá *et al.*, 2013). A segunda fração mais fina de cinzas volantes são removidas do efluente gasoso em filtros eletrostáticos, ou filtros de mangas ou lavadores húmidos (Sá *et al.*, 2013).

A fração mais fina [cinzas volantes ($< 1\mu\text{m}$)], está enriquecida em cloretos alcalinos, sulfatos e alguns elementos vestigiais como o chumbo e o zinco, que são originados a partir de elementos volatilizados cujos núcleos formam novas partículas ou condensam em partículas já existentes durante o arrefecimento do gás de combustão (Vassilev *et al.*, 2013).

Por outro lado, a fração mais grosseira das cinzas de fundo ($> 1\mu\text{m}$) é composta por voláteis contendo elementos como cálcio, sílica, magnésio, alumínio, ferro, manganês e fósforo que se mantiveram nas fases sólidas e/ou líquidas durante o processo de combustão (Vassilev *et al.*, 2012).

As cinzas resultantes da combustão de biomassa representam entre 2% a 20% do material queimado, dependendo do tipo e origem da biomassa e da eficiência da tecnologia (Sá *et al.*, 2013).

No entanto, a composição das cinzas de fundo originadas é bastante heterogénea possuindo elementos ao longo da tabela periódica, sendo bastante difícil de as caracterizar.

Por outro lado, as cinzas de fundo com origem na biomassa possuem elevadas:

- *Quantidades de cálcio e magnésio constituindo uma mais valia para a utilização como fertilizantes, correção de pH de solos, produção de materiais para construção como cimento e argamassas, adsorventes e cerâmicas (Vassilev et al., 2015).*
- *A formação de minerais como os aluminossilicatos hidratados, portlandita, calcite estão associados a elevados pH e diminuem consideravelmente a porosidade das cinzas de fundo e as ligações químicas dos elementos (Vassilev et al., 2015; Vassilev et al., 2013).*
- *O pH do lixiviado das cinzas de fundo de biomassa é bastante alcalino encontrando-se entre 8,1 a 12,9 (Vassilev et al., 2015). Talvez devido ao, enriquecimento de elementos como o cálcio, cloro, potássio, magnésio, manganês, sódio e fósforo, possuindo a vantagem de não existirem minerais com elementos como o alumínio, o ferro, silicatos e titânio contrariamente às cinzas de fundo do carvão (Vassilev et al., 2010).*
- *A baixa densidade aparente das cinzas de fundo (80 a 430 kg/m³), aumenta a eletricidade estática das partículas criando uma tendência para a adesão (Miller et al., 2002 como citado por Vassilev et al., 2015).*

4.4. A mistura de composto com cinzas de fundo de biomassa para controlo do processo de compostagem

Nos países escandinavos, as cinzas de fundo têm sido adicionadas aos resíduos como um aditivo para melhorar a degradação destes, com o objetivo de evitar odores desagradáveis e a baixa qualidade do composto.

Na fase termofílica inicial existe uma fase denominada de acidogénese caracterizada pela produção de ácidos orgânicos, aumento da produção de CO₂ que resulta numa diminuição do pH para valores entre 4,5 a 5 (Azim *et al.*, 2018; Piedade & Aguiar, 2010; Poincelot, 1972).

O pH abaixo de 5 demonstrou uma diminuição da atividade microbológica (Cheung *et al.*, 2010 como citado por Asquer *et al.*, 2017;), tendo-se estimado que o pH ideal para a atividade microbológica se situe entre 6 e 9 (Nakasaki *et al.*, 1999).

Os trabalhos desenvolvidos procuraram estudar as alterações que a cinza de biomassa pode causar no processo de compostagem através da monitorização, avaliação da qualidade final do composto e efeito do composto nos solos. Na tabela 4.2, apresentam-se os trabalhos desenvolvidos pelos autores utilizados na discussão dos resultados, assim como a tecnologia de compostagem e a quantidade de cinzas de fundo adicionadas:

Tabela 4.2 – Tecnologia utilizada para a compostagem e a quantidade de cinza adicionada ao composto, por autor.

Autores	Quantidade de cinzas de fundo no composto (% p/p)	Tecnologia de compostagem
Asquer <i>et al.</i> (2017)	0 %	Reator com ar forçado
	2 %	
	4 %	
	8 %	
Kuba <i>et al.</i> (2008)	0 %	Pilhas estáticas com ar forçado com duas viragens
	8 %	
	16 %	
Kurola <i>et al.</i> (2011)	0 %	Reator rotativo horizontal
	2 %	
	8 %	
Koivula <i>et al.</i> (2004)	0 %	Reator rotativo horizontal
	10 %	
	20 %	
Ricardo <i>et al.</i> (2011)	0 %	Pilhas com revolvimento periódico
	2 %	
	4 %	
	8 %	

4.4.1. Temperatura

Em todas as experiências conduzidas, os perfis de temperatura comuns durante o processo de compostagem mantiveram-se inclusive nas pilhas com cinzas de fundo, no entanto, observou-se que a adição de cinzas de fundo aumentou a temperatura máxima atingida durante a fase termofílica.

Este aumento foi associado às cinzas de fundo conferirem uma capacidade térmica mássica superior ao composto e o efeito das reações exotérmicas de carbonização quando este é sujeito a processos aeróbios (Asquer *et al.*, 2017; Koivula *et al.*, 2004; Kuba *et al.*, 2008; Kurola *et al.*, 2011). Ricardo *et al.* (2014) referiu que a adição das cinzas de fundo de biomassa ao composto melhorou o processo de higienização, ao aumentar o período que o composto se encontra com elevadas temperaturas.

4.4.2. pH

Os perfis do pH evoluíram de maneira idêntica, no composto com cinzas de fundo, no entanto a fase da acidogénese foi mais curta e o pH diminuiu apenas ligeiramente devido ao poder tampão conferido pelas cinzas de fundo (Asquer *et al.*, 2017; Koivula *et al.*, 2004; Ricardo *et al.*, 2014).

Quando se relaciona o longo período que se mantém na fase termofílica com o pH elevado (8 a 10 unidades), resultante da adição das cinzas de fundo alcalinas ao composto, existe a possibilidade de perdas de azoto devido à volatilização da amónia (Asquer *et al.*, 2017; Koivula *et al.*, 2004; Kuba *et al.*, 2008; Ricardo *et al.*, 2014).

À exceção de Koivula *et al.* (2004), todos os autores anteriormente referidos na tabela 4.2, observaram que a adição de cinzas de fundo de biomassa ao composto aumenta o pH durante a compostagem e após a fase de maturação.

Kuba *et al.* (2008), associou a falta de aumento do pH nos estudos conduzidos por Koivula *et al.* (2004), ao efeito tampão que a matéria orgânica presente no composto possui.

4.4.3. Humidade

A humidade é um parâmetro que sofre imensas alterações ao longo do processo de compostagem causado pelo aumento da temperatura do composto, existindo a necessidade controlar a humidade deste para manter os microrganismos em atividade. O aumento da temperatura durante processo da compostagem evapora a água, tendo sido necessário pulverizar mais as pilhas com mais aditivo de cinzas de fundo do que as outras devido às temperaturas mais elevadas terem sido atingidas nestas (Asquer *et al.*, 2017).

No final do processo de compostagem, a humidade estabeleceu-se entre os 43% e os 54% (Asquer *et al.*, 2017; Fernández-Delgado Juárez *et al.*, 2015)

4.4.4. Condutividade elétrica

A madeira encontra-se associada a elevadas CE, no entanto, quando esta madeira é carbonizada esta desce consideravelmente devido à baixa solubilização das cinzas de fundo (Oberberger, 1997 citado por Kuba *et al.*, 2008). Com a adição das cinzas de fundo, Koivula *et al.* (2004) e Kuba *et al.* (2008), reportaram uma diminuição da condutividade elétrica.

No entanto, Ricardo *et al.* (2014) e Asquer *et al.* (2017), corroboraram o aumento da CE destas com testes de germinação, tendo sido associado a quantidades elevadas de contaminantes nas cinzas de fundo nomeadamente a presença de sódio.

O aumento da CE nas cinzas de fundo de biomassa, pode-se ainda encontrar associada à presença de biomassa por queimar.

4.4.5. Ácido Sulfídrico, oxigénio, metano e o dióxido de carbono

Com o aumento das cinzas de fundo de biomassa no composto, Koivula *et al.* (2004), demonstrou que a disponibilidade de oxigénio foi melhorada, assim como a redução de produção de gases com mau odor. Foi colocada como hipótese que as cinzas de fundo possuem capacidade de suprimir maus odores devido à quantidade elevada de carbono e as suas características se assimilarem a filtros de carvão ativado ou o facto de as cinzas de fundo possuírem características alcalinas que inibem a formação destes gases.

No entanto, de modo a minimizar maus odores um controlo do oxigénio no processo de compostagem revelou-se essencial (Koivula *et al.*, 2004)

4.4.6. Matéria orgânica

Asquer *et al.* (2017) e Koivula *et al.*, (2004) observaram uma redução nos sólidos voláteis nos compostos com a mistura de cinzas de fundo, tendo associado estes resultados: à melhoria da degradação da matéria orgânica por facilitar a degradação da lignina, celulose e hemicelulose ou ao efeito da diluição (Fernández-Delgado Juárez *et al.*, 2015; Kurola *et al.*, 2011).

Koivula *et al.* (2004) ainda observou um aumento da velocidade de formação e da quantidade de ácidos húmicos no composto que tinha mais cinzas de fundo.

4.4.7. Nutrientes

A quantidade de carbono orgânico e do azoto diminuiu durante o processo de degradação com o aumento das cinzas de fundo (Kuba *et al.*, 2008; Ricardo *et al.*, 2014), tendo sido este efeito associado à melhoria da mineralização e ao efeito de diluição da mistura com as cinzas de fundo (Asquer *et al.*, 2017; Fernández-Delgado Juárez *et al.*, 2015; Koivula *et al.*, 2004; Kurola *et al.*, 2011).

Quanto ao rácio C/N, quando este é abaixo de 12, a amónia pode lixiviar causando problemas nos lençóis de água, tendo sido observado que a adição das cinzas de fundo diminuiu este efeito (Kuba *et al.*, 2008)

Koivula *et al.* (2004) observou que a quantidade de azoto e o fósforo na forma solúvel presente no composto, era superior nas pilhas com adição de cinzas de fundo após a maturação.

Já, Kuba *et al.* (2008), observou que nos compostos com cinzas de fundo, elementos como o magnésio e o potássio aumentaram, ao contrário do fósforo que diminuiu. Este efeito foi associado ao efeito de diluição ou a uma menor eficiência de extração das cinzas de fundo quando esta se encontra inserida na matriz do composto.

Asquer *et al.* (2017) encontrou correlação entre o carbono total húmico nos compostos e a disponibilidade de sódio e potássio.

As frações solúveis de cálcio e magnésio foram inferiores para os compostos enriquecidos com cinzas de fundo, existindo a possibilidade de ser devido às reações de carbonização que ocorreram na presença de oxigénio com a alcalinidade das cinzas de fundo (Asquer *et al.*, 2017; Koivula *et al.*, 2004)

4.4.8. Massa volúmica

A massa volúmica aumentou ao longo do processo de compostagem (com uma ligeira diminuição no início), tendo-se evidenciado valores mais elevados no composto com mistura das cinzas de fundo (Asquer *et al.*, 2017).

4.4.9. Atividade microbiológica

Kuba *et al.* (2011) sugere que a quantidade elevada de biomassa microbiana pode garantir a fixação do azoto no composto quando existe um pH elevado e uma longa fase termofílica.

Foi demonstrado o efeito positivo sobre as colónias de microrganismos nos solos de carácter mais ácido, devido ao aumento do pH passou a existir amonificação nestes solos que possuem carência de azoto (Kuba *et al.*, 2008). Além disso, não foram encontrados indicadores de *stress* que compromettesse a eficiência metabólica dos microrganismos em resultado da adição das cinzas de fundo ao composto.

Kurola *et al.* (2011) observou que o aumento das cinzas de fundo no composto coincidiu com o nível mais elevado de produção de CO₂ e com o aumento da temperatura, indicando uma elevada atividade microbiológica em resultado da adição.

4.4.10. Crescimento das plantas

Os resultados adquiridos por Kuba *et al.* (2011), demonstraram que todos os testes biológicos realizados indicam que a adição de cinzas de fundo de biomassa não possui qualquer efeito adverso no crescimento das plantas, nem quando a CE é superior.

4.4.11. Metais pesados

Para minimizar o risco de contaminação ambiental por metais pesados deve ser implementado um rigoroso controlo do conteúdo de metais pesados das cinzas de fundo de biomassa a incorporar (Asquer *et al.*, 2017; Bougnom *et al.*, 2010; Koivula *et al.*, 2004; Kuba *et al.*, 2008; Kurola *et al.*, 2011; Ricardo *et al.*, 2014). Com a exceção do níquel, crómio e do zinco a maioria dos compostos com adição de cinzas de fundo possuíam menores quantidades de metais pesados (Kuba *et al.*, 2008).

A adição de cinzas de fundo de biomassa nos solos age como um fertilizante mineral demonstrando a longo prazo uma elevação no pH (Holzner, 1999, Perkiömäki & Fritze, 2002 e Saarsalmi *et al.*, 2004 citado por Kuba *et al.*, 2008;), com o aumento de cálcio, magnésio e sódio (Perkiömäki & Fritze, 2002 citado por Kuba *et al.*, 2008).

5. CASO DE ESTUDO

5.1. Centrais Termoelétricas de Biomassa

A biomassa é uma fonte de energia renovável abundante, de baixo custo, permite o reaproveitamento de resíduos, com grande potencial de desenvolvimento e, é menos poluente que outras formas de energias como a obtida a partir de combustíveis fósseis.

A combustão de biomassa provoca a libertação de dióxido de carbono na atmosfera, mas, como este composto havia sido previamente absorvido pelas plantas que deram origem ao combustível, o balanço de emissões de CO₂ é nulo.

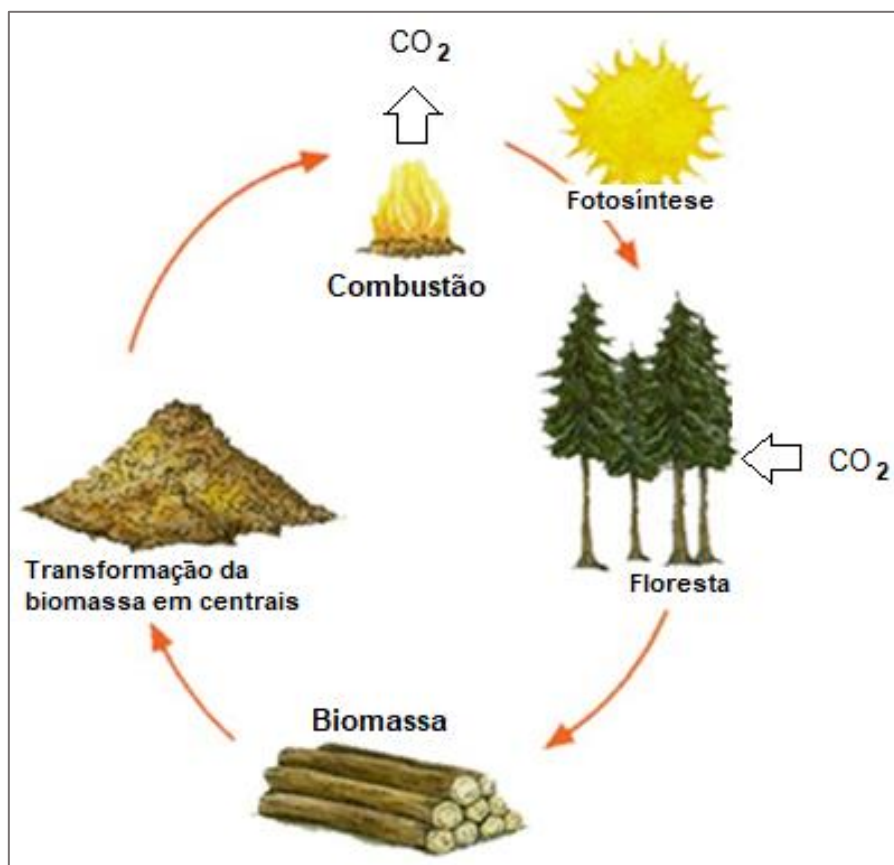


Figura 5.1 - O ciclo da biomassa.

Com o novo plano Estratégia Nacional para a Energia 2020, apresentado no início de 2010, o eixo das Energias Renováveis refere o cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no contexto das políticas europeias de combate as alterações climáticas, permitindo que em 2020, 60% da eletricidade produzida tenha origem em fontes renováveis.

Deste modo, as centrais de biomassa possibilitam este objetivo, pois produzem energia elétrica a partir da energia térmica que é gerada durante o processo de combustão da biomassa.

Para além da produção de eletricidade, as centrais termoelétricas dispõem de sistema de cogeração que aproveita o calor produzido na geração de eletricidade.

Como a geração de energia é realizada a partir do vapor e do processo da combustão estas centrais que possuem um rendimento superior a 80% (Fernandes, 2015).

Em centrais de biomassa dedicadas para apenas produzir energia elétrica, não aproveitando o calor originado na combustão da biomassa, o seu rendimento é consideravelmente inferior situando-se entre 20% a 40% (Fernandes, 2015).

Na tabela seguinte constam as centrais termoelétricas de biomassa (dedicada e de cogeração) a operar em Portugal, bem como a respetiva potência instalada.

Tabela 5.1 - Centrais termoelétricas, dedicadas e de cogeração a operar em Portugal. (Fonte: E2p, n.d.)

Empresa	Concelho	Potência Instalada (MW)
Altri & EDP- EDP Produção Bioelétrica, S.A.	Figueira da Foz	34,3
Amorim	Santa Maria da Feira	1
Caima Energia – Empresa de Gestão e Exploração de Energia, S.A.	Constância	7,04
	Santarém	8
CELBI – Celulose Beira Industrial, S.A.	Figueira da Foz	6,28
		70,96
Celtejo- Empresa de Celulose do Tejo, S.A.	Vila Velha de Ródão	23,69
Central Termoelétrica de Biomassa de Terras de Santa Maria, S.A.	Oliveira de Azeméis	10,75
CENTROLIVA, Indústria e Energia, S.A.	Vila Velha de Ródão	5,63
EDP Produção – Bioelétrica, S.A.	Constância	13,23
	Mortágua	9
	Vila Velha de Ródão	12,5
EUROPA&C Energia Viana	Viana do Castelo	103,7
Lavos	Figueira da Foz	95
PA BIOMASSA, S.A.	Vila Nova de Famalicão	10
Palser- Bioenergia e Paletes, Lda.	Sertão	3,3
Probiomass	Vila Nova de Famalicão	10,8
SIAF	Viseu	3,8
Tavfer – Ecotator, Lda	Belmonte	2,53
The Navigator Company	Aveiro	35,1
		12,5
	Setúbal	53,9
		12,5

Salienta-se ainda que as cinzas de fundo que foram disponibilizadas para utilizar nos trabalhos deste estudo, são provenientes da *Central Termoelétrica de Biomassa de Terras de Santa Maria, S.A.* Como tal, descreve-se em seguida de forma resumida, o funcionamento desta Central Termoelétrica.

5.1.1. Central Termoelétrica de Biomassa de Terras de Santa Maria, S.A.

Esta central possui uma potência instalada de 10 MW_e, o equivalente a fornecer energia a 20 000 habitações. A biomassa consumida ronda as 12 t/h com 35% de humidade e com um PCI de 13 000 kJ/kg.

A biomassa florestal tem uma amostra recolhida à entrada da central, logo após o sistema de pesagem em báscula, esta será armazenada numa área com dimensão suficiente para três semanas.

O método de armazenamento da matéria-prima baseia-se na humidade relativa e no grau de trituração.

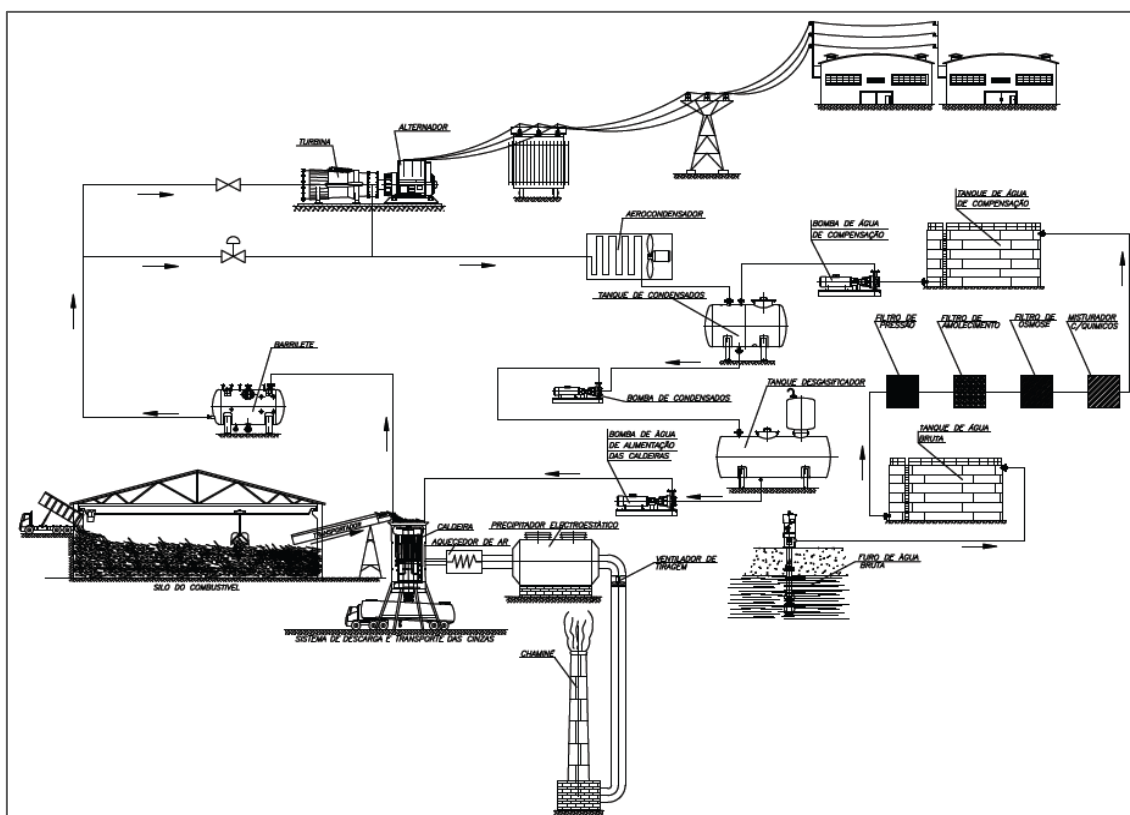


Figura 5.2 - Fluxograma da Central de Biomassa das Terras de Santa Marta, S.A.(Fonte: CBTSM)

No que respeita ao funcionamento da central, a sequência da operação é a seguinte:

- A alimentação à caldeira é realizada através de um tapete transportador que doseia e pesa o produto. A caldeira possui um sistema de produção de vapor que opera à pressão de 60 bar, com uma temperatura de 450 °C com uma eficiência de 91%.
- Esta caldeira possui uma entrada de ar primária na grelha localizada na base e uma de ar secundário a meio da caldeira, ambas com um caudal de 56 000 Nm³/h.
- O vapor originado é distribuído por um barrilete que aciona a turbina, que por sua vez coloca o gerador elétrico em funcionamento para a produção de eletricidade.

- *Deste modo, é gerada energia elétrica a partir da energia térmica, com um rendimento de aproximadamente 26%. Este vapor é encaminhado da turbina para um aerocondensador, passando ao estado líquido, sendo os condensados injetados novamente na caldeira através da bomba de condensados.*
- *Os gases quentes resultantes da combustão transferem a sua energia por radiação e convecção no sobreaquecedor e no economizador, passando a energia térmica presente nestes para a água desmineralizada que circula nas tubagens.*
- *A etapa seguinte é o sistema de depuração de gases que através de um ventilador extrai os gases de combustão, através de ciclones e electrofiltros em série, antes destes serem libertados pela chaminé.*
- *A água utilizada na tubagem dos permutadores, é extraída de um furo artesiano e posteriormente submetida a osmose inversa e tratamento químico.*
- *O armazenamento desta é feito no tanque de compensados e é debitada através de uma bomba de compensação.*
- *As cinzas de fundo e as cinzas volantes são armazenadas separadamente.*

As cinzas de fundo da caldeira são retiradas e transportadas através de *tapete de correias* até aos contentores destinados a este material e, no economizador, as cinzas volantes são retiradas e transportadas por um *parafuso sem fim* até ao contentor destinado à receção deste tipo específico de cinzas.

A produção de cinzas de fundo situa-se, em média, em cerca de 800 kg/h, resultando ao fim de um ano num total de cerca de 6 450 t/ano.

5.2. Ecoparque de Setúbal da AMARSUL S.A.

A AMARSUL® é o sistema responsável pela gestão de resíduos dos municípios de: Alcochete, Almada, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Seixal, Sesimbra e Setúbal.

Estes municípios abrangem uma área de 1 625 km² e encaminham para tratamento e eliminação dos resíduos urbanos que são produzidos pelo respetivo universo de população, de cerca 783 300 habitantes.

As infraestruturas atualmente em exploração consistem em; 2 aterros sanitários, 2 unidades TMB, 1 unidade de TM, 1 estação de triagem e 7 ecocentros.

Relativamente ao Ecoparque de Setúbal salienta-se o seguinte;

- **Localização:** *Poçoilos, Estrada de Algeruz, Freguesia de S. Sebastião.*
- **Origem dos RU:** *Municípios de Setúbal e Palmela.*
- **Resíduos aceites/tratados:** *Resíduos urbanos e resíduos verdes.*
- **Processo de tratamento:** *Tratamento Mecânico e Biológico (compostagem)*
- **Data de entrada em funcionamento:** *Novembro de 1994*

5.2.1. Processo da central de Tratamento Mecânico e Biológico

No conceito de economia circular, os resíduos orgânicos são na sua totalidade utilizados como recursos para produção de corretivos orgânicos do solo, elementos fertilizantes, substratos de cultura, germinação e desenvolvimento de outros produtos inovadores.

A valorização destes resíduos orgânicos permite a substituição de fertilizantes minerais produzidos com recurso a hidrocarbonetos e, a substituição parcial ou total de utilização de turfas e rochas minerais ricas em fosfatos.

O TMB corresponde à terminologia utilizada para designar a integração de várias operações unitárias desenvolvidas em instalações de gestão de resíduos, tendo como principais etapas:

- Zona de receção dos RU (em plataforma ou em fossas),
- Pré-Triagem (Tratamento Mecânico),
- Triagem de Recicláveis,
- Compostagem (aeróbia por pilhas ou túneis e/ou por digestão anaeróbia),
- Pós-Compostagem,
- Parque de Composto Orgânico e,
- Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

Estas instalações combinam a separação mecânica de diferentes frações que compõem os RU com a estabilização da matéria orgânica através de processo biológico, nomeadamente por compostagem aeróbia e/ou por digestão anaeróbia.

A fração biológica separada é encaminhada para o tratamento biológico que permite a degradação destes resíduos em composto e, na digestão anaeróbia em subprodutos nomeadamente o biogás. Este pode sofrer posteriormente aproveitamento energético no Centro Electroprodutor associado (com motor de combustão), com injeção da energia produzida na REN.

A parte mecânica refere-se aos equipamentos do tapete de triagem, separação eletromagnética e balístico que permitem a separação da fração biológica dos resíduos que podem ser reciclados.

5.2.2. Central de Tratamento Mecânico e Biológico do Ecoparque de Setúbal

O Ecoparque de Setúbal possui uma área de cerca de 4,4 ha, localizando-se na Freguesia de São Sebastião, distrito de Setúbal.

Esta instalação possui uma capacidade de tratamento de RSU de 60 000 t/ano, produzindo 7000 t/ano de composto e 600 t/ano de metais para reciclagem.

Na figura 5.3, encontra-se um esquema do processo da central de Setúbal:

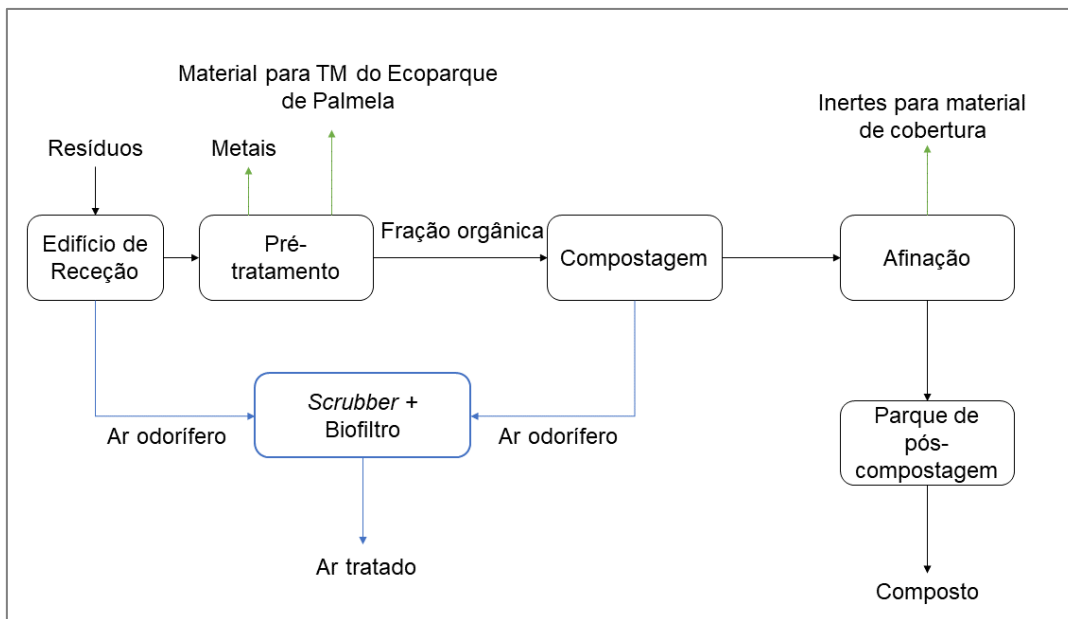


Figura 5.3 - Diagrama da TMB de Setúbal.

Em termos da operação na Central de TMB de Setúbal as principais etapas do processo são:

- **Receção e pré-tratamento**

Os veículos responsáveis pela recolha dos RU indiferenciados são controlados na portaria com pesagem na báscula, sendo orientados para o Edifício de Receção para efetuar a descarga.

A renovação de ar no interior deste edifício é assegurada por um sistema de extração, sendo o ar contaminado encaminhado para tratamento.

O Pré-tratamento tem como objetivo separar a fração orgânica destinada à compostagem, podendo ainda proporcionar a recuperação de embalagens de metal para reciclagem.

A alimentação da linha de pré-tratamento é realizada ainda no Edifício de Receção com recurso a uma máquina multifunções telescópica que introduz os resíduos num abre-sacos.



Figura 5.4 - Área de receção e descarga em abre-sacos.

Os resíduos após passagem no abre-sacos são então conduzidos para o Edifício de Pré-tratamento onde é alvo de uma sequência de processos de separação mecânica incluindo: crivagem e separação eletromagnética de metais.

Desta etapa do processo resultam: matéria orgânica para compostagem, aço e alumínio para reciclagem e ainda um refugo que é submetido a tratamento mecânico (TM) no Ecoparque de Palmela da Amarsul.

Dentro do edifício existe extração do ar com odor que será posteriormente encaminhado para um *scrubber* e um biofiltro.



Figura 5.5 - Linha de Tratamento Mecânico.

- **Compostagem**

A compostagem ocorre num ambiente controlado no que se refere à temperatura, humidade e arejamento.

Este processo tem como objetivo promover a higienização e a estabilização da matéria orgânica e otimizar as suas propriedades físico-químicas e microbiológicas para utilização como fertilizante agrícola.

A compostagem tem lugar num pavilhão totalmente fechado para evitar a libertação de odores. A fração orgânica resultante do Pré-Tratamento é empilhada no Edifício de Compostagem com recurso a uma Máquina de Deposição automática.

A homogeneização e irrigação desta fração é assegurada através de um equipamento de revolvimento que se encontra sobre carris.

O leito de compostagem (figura 5.6) é percorrido por tubos perfurados que se encontram conectados a um sistema de ventilação por sucção (arejamento em modo negativo).

O tempo de residência situa-se nas 8 a 11 semanas, sendo transferido para o Edifício da Afinação por uma máquina de retoma, o composto bruto.



Figura 5.6 - Edifício da Compostagem. Máquina de deposição automática

O ar desta instalação é enviado para o sistema de tratamento de odores, recebendo também as emissões difusas próximas do teto do Edifício de Compostagem.

O processo de afinação remove materiais inertes como pedras, plásticos e alguns materiais não decompostos durante o processo de compostagem, com o objetivo de melhorar as características físicas do composto.

Este consiste num processo mecânico constituído por uma crivagem seguida de uma separação densimétrica como se pode ver na figura 5.7.



Figura 5.7 - Edifício de afinação.

Após a afinação este é transportado através de uma tela transportadora para o parque de composto. Os materiais rejeitados deste processo são utilizados como material de cobertura no aterro de Palmela da AMARSUL.

O parque de composto (figura 5.8) é uma área pavimentada e coberta, na qual o composto ficará durante 1 mês. A pós-compostagem constitui a fase final do processo de produção de composto na qual o material é colocado em pilhas de secção triangular, que são irrigadas e revolvidas periodicamente. No final o composto originado é o “AMARTERRA”, que é um fertilizante aplicado na agricultura.



Figura 5.8 - Parque de composto.

Os efluentes gasosos gerados no edifício de receção e compostagem possuem um odor desagradável, sendo necessário a aplicação de um tratamento. O ar proveniente do edifício de receção é encaminhado para ser humificado em geradores de nevoeiro instalados em paralelo.

O ar proveniente da sucção de ar do leito possui uma elevada carga poluente e para a remoção do amoníaco recorre-se a um *scrubber* ácido (figura 5.9).



Figura 5.9 - Scrubber ácido.

De seguida os fluxos provenientes de ambos os edifícios são encaminhados para um biofiltro (figura 5.10). O biofiltro possui no seu meio filtrante aparas de madeira, casca de pinheiro e composto. Nesta fase, o ar que possui odor é adsorvido e convertido em dióxido de carbono e vapor de água pelo biofiltro.



Figura 5.10 - Biofiltro

Como subproduto é originado um efluente líquido carregado em sulfato de amónio, este é comercializado como AMARVERDE® e utilizado como fertilizante líquido na agricultura.

A informação relativa às principais etapas do processo na TMB de Setúbal e as fotos utilizadas neste capítulo foram generosamente fornecidas em setembro de 2020 pela Eng. Maria José Sebastião, Diretora da AMARSUL.

6. METODOLOGIA

6.1. Composto “Amarterra” e as cinzas de fundo da central de biomassa

A AMARSUL produz na TMB de Setúbal um corretivo agrícola orgânico à base dos resíduos orgânicos de recolha indiferenciada o AMARTERRA® e um adubo mineral líquido com azoto e enxofre, o AMARVERDE®.

A classificação do composto é realizada de acordo com o decreto-lei nº 103/2015, que estabelece parâmetros limitantes e, por conseguinte, a sua potencial aplicação no mercado.

Nos capítulos seguintes serão referidas as metodologias aplicadas para a amostragem, análise e tratamento dos dados.

O trabalho consistiu na análise da qualidade do composto proveniente de resíduos urbanos, como tal os ensaios realizados foram:

- *Utilização de crivos AFNOR para a distribuição granulométrica;*
- *pH em água;*
- *Condutividade elétrica;*
- *Teste da proveta para determinação da massa volúmica aparente;*
- *Secagem em estufa a 105°C para determinação da quantidade de água;*
- *Perda de massa por ignição (PMI) a 505°C para determinação da quantidade de matéria orgânica;*
- *Teste do auto-aquecimento para a determinação da estabilidade do composto;*
- *Digestão assistida por micro-ondas seguida de análise por ICP-AOS para a determinação de metais pesados na amostra.*

Adicionalmente, constituíram-se 3 misturas de composto e cinzas de fundo com relação (p/p) descrita de seguida:

- **Mistura 1:** *Composto 90% e cinzas de fundo 10%.*
- **Mistura 2:** *Composto 80% e cinzas de fundo 20%.*
- **Mistura 3:** *Composto 70% e cinzas de fundo 30%.*

A amostragem do composto foi realizada a 26 de junho de 2020, tendo consistido na recolha aleatória deste material após a fase de higienização para dois sacos, cada um com 10 kg. Após a chegada ao laboratório estas amostras foram conservadas a 4°C numa arca frigorífica. O composto utilizado para os ensaios laboratoriais foi o “AMARTERRA” proveniente de RU indiferenciado rececionado na empresa AMARSUL. Antes do início de cada ensaio as amostras foram mantidas durante algum tempo à temperatura ambiente e remexidas.

As cinzas de fundo foram recolhidas dia 13 de maio de 2020 e armazenadas à temperatura ambiente até à chegada ao laboratório no dia 14 de julho de 2020, onde foram colocadas numa arca frigorífica. No caso das cinzas de fundo procedeu-se à utilização de um íman para garantir que não existiam materiais que danificavam os equipamentos.

Devido à quantidade de matéria por queimar (inqueimados) presente nas cinzas de fundo de biomassa estas foram crivadas com malha de dimensão de 25 mm antes de se iniciar os procedimentos laboratoriais. Foi utilizada a metodologia de quarteamento (figura 6.1) para garantir que a amostra do composto era uniforme.

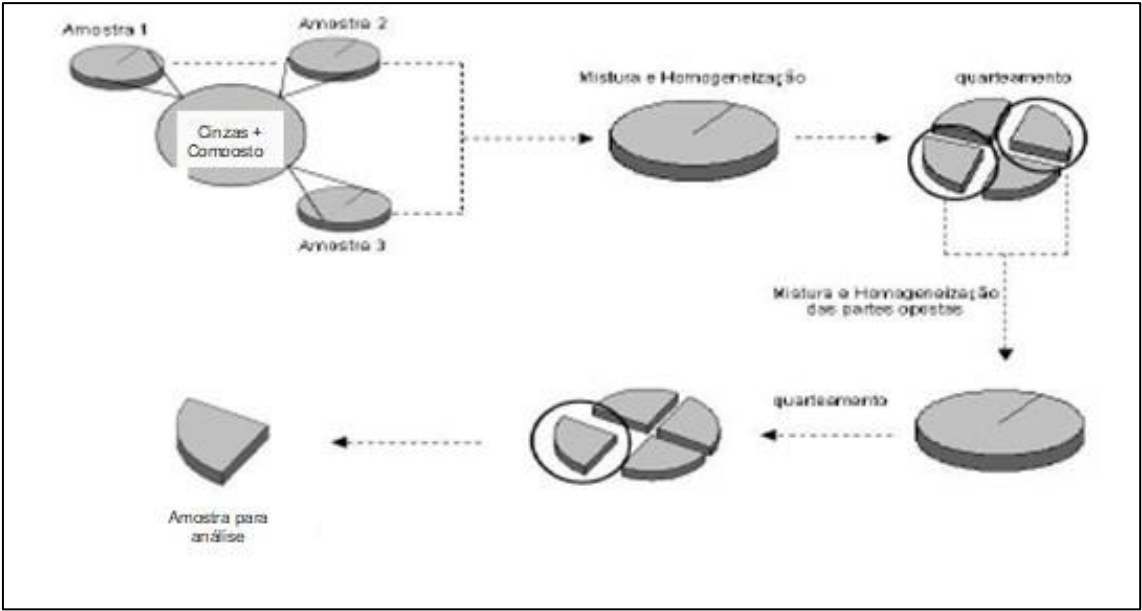


Figura 6.1- Metodologia de amostragem (quarteamento).

Na tabela 6.1 pode-se observar a cronologia dos ensaios laboratoriais realizados:

Tabela 6.1 - Cronologia dos ensaios laboratoriais.

Parâmetros	Julho					
	12	13	14	15	16	17
Granulometria		Composto	Cinzas	Mistura 1 Mistura 2 Mistura 3		
pH		Cinzas Composto				
Condutividade		Cinzas Composto				
Massa volúmica aparente		Composto			Mistura 1 Mistura 2 Mistura 3	
Humidade	Cinzas Composto			Mistura 1 Mistura 2 Mistura 3		
Matéria orgânica			Cinzas Composto			Mistura 1 Mistura 2 Mistura 3
Teste do auto-aquecimento			Composto			

6.2. Granulometria

A granulometria do composto determina-se através da norma UNE 77314:2001.

6.2.1. Material e equipamento

- *Balança (Marca: KERN; Modelo: 572; Erro associado de 0,001 g);*
- *Crivos Retsch® Test Sieves de malha quadrada: 2 mm, 6,3 mm, 12,5 mm e 25 mm;*
- *Colher grande;*
- *Pincel.*

6.2.2. Procedimento experimental

Para definir a granulometria utilizaram-se os peneiros de 2 mm, 6,3 mm, 12,5 mm e 25 mm. Posteriormente pesaram-se, respetivamente, cada uma das componentes retidas em cada um dos crivos.

6.2.3. Tratamento dos dados

De modo a identificar a granulometria, considera-se que a amostra retida no crivo de dimensão 6,3 mm, se enquadra na dimensão da gama dos 12,5 mm a 6,3 mm.

Foram consideradas as perdas no processo de crivagem e foi considerada a seguinte equação de modo a definir a granulometria:

Equação 6.1 - Cálculo da granulometria retida num crivo de x mm em %.

$$Granulometria = \frac{m_{crivo\ x\ mm}}{m_{total\ amostra}} \times 100$$

6.3. Determinação da estabilidade do composto

O grau de maturação de um dado composto é medido através o teste do auto-aquecimento, realizado de acordo com a norma CEN/TC 223, conforme descrito no documento *Determination of Aerobic biological activity – part 2: self heating test for compost (2008)*.

6.3.1. Material e equipamento

- *Crivo malha de 10 mm;*
- *Vaso Dewar (Marca: Dilvac; Volume: 2 l; Diâmetro interno: 10,5 cm; Altura interna: 25 cm);*
- *Termómetro de mercúrio (Thies Klima™).*

6.3.2. Procedimento experimental

O teste do auto-aquecimento deve ser realizado assim que a amostra é recolhida, mas se não for possível, deve ser conservada à temperatura de 5°C numa arca frigorífica. A amostra foi crivada com a malha de 10 mm antes do enchimento do vaso até 2/3, evitando a compactação desta. Colocou-se papel de alumínio com furos e o termómetro, deixando-se o vaso à temperatura ambiente durante 10 dias, registando-se a temperatura máxima atingida.

6.4. Humidade

A humidade é determinada através da secagem da amostra a 105°C em estufa, assumindo-se que esta perda de massa em peso é diretamente proporcional à perda de água presente na amostra. Tendo sido a análise realizada de acordo com a norma EN 12880:2000 (*aplicável à determinação de resíduo seco e teor de água de lamas que incluem matéria líquida, pastosa ou sólida*).

6.4.1. Material e equipamento

- *Balança (Marca: AND; Modelo: GF300; Erro associado: 0,001 g);*
- *Exsicador;*
- *Estufa (Marca: Memert);*
- *Colher;*
- *Recipientes;*
- *Luvas.*

6.4.2. Procedimento experimental

Para a realização desta análise foi realizado o peso da amostra antes e após ir à estufa. A estufa encontrar-se-ia a uma temperatura de 105°C e retirou-se a amostra após peso constante. Esta amostra foi transferida para um exsicador e posteriormente pesada.

6.4.3. Tratamento dos dados

De modo a calcular a humidade presente na amostra, utilizou-se a seguinte equação:

Equação 6.2 - Humidade da amostra em %.

$$\text{Humidade} = \frac{m_{\text{antes da estufa}} - m_{\text{após estufa a 105}^{\circ}\text{C}}}{m_{\text{após estufa a 105}^{\circ}\text{C}} - m_{\text{recipiente}}} \times 100$$

6.5. pH (H₂O) e Condutividade Elétrica a 25 °C

O pH é medido de acordo com a EN 13037 e a condutividade elétrica de acordo com a EN 13038 que se encontram no documento *Determination of electrical conductivity in soil, sewage sludge and biowaste (2005)*.

6.5.1. Materiais e Equipamentos

- *Eléctrodo Sentix® 41 da WTW;*
- *Potenciómetro Inolab® pH 720 da Thermo Scientific®;*
- *Eléctrodo de condutividade Orion DuraProbe™ 013005MD da Thermo Electron Corporation®;*
- *Potenciómetro Orion Star Plus™ da Thermo Scientific®;*

6.5.2. Procedimento experimental

O pH e a CE são realizadas recorrendo a uma relação de 5 g de amostra fresca para 50 ml de água destilada.

Esta mistura é agitada durante 2 horas e posteriormente são medidas com recurso a um eletrodo respetivamente demonstrado na figura 6.2.

Após a medição da CE aplicou-se um fator corretivo constante na tabela do anexo IV na tabela IV.1., para esta ficar à temperatura de 25°C.



Figura 6.2 - Medição do pH (esquerda) e da CE (direita).

6.6. Matéria volátil

A matéria volátil presente no composto é determinada através de perda de massa por ignição (PMI) ou *Loss-on-Ignition* (LOI) para os solos, de acordo com a norma EN 12879:2000.

Este teste baseia-se no facto da perda de massa entre as temperaturas 500°C a 575°C nos solos ser diretamente proporcional à quantidade matéria orgânica presente nos solos.

6.6.1. Materiais e equipamentos

- *Balança* (Marca: ©Mettler Toledo; Modelo: AG204; Erro associado de 0,1 mg);
- *Moinho de impacto/martelo* (Marca: ©Gravimeta; Modelo: SM 300)
- *Cadinhos*;
- *Espátula*;
- *Exsicador*;
- *Mufla* (Marca: © 2020 Carbolite Gero Ltd; Modelo: ESF 12/10).

6.6.2. Procedimento experimental

Para a realização desta análise procedeu-se à trituração da amostra seca em estufa com recurso a um moinho de impacto para a dimensão de 2 mm.

De seguida pesaram-se cadinhos com 2 g de amostra seca e foram colocadas num exsicador para ser colocados na mufla durante 2 horas a 550°C.

Após o arrefecimento da mufla, estas foram transferidas para um exsicador sendo novamente pesadas de modo a obter a quantidade de matéria orgânica volatilizada.

6.6.3. Tratamento de dados

Para o tratamento dos dados da matéria orgânica procedeu-se à determinação através da diferença do peso antes e após a mufla, como demonstrado de seguida:

Equação 6.3 - Cálculo da matéria volátil presente na amostra em %.

$$MO = \frac{m_{amostra\ seca} - m_{amostra\ após\ a\ estufa}}{m_{amostra\ seca} - m_{cadinho}} \times 100$$

6.7. Massa Volúmica Aparente

A massa volúmica aparente utiliza o teste da proveta e é realizado de acordo com a norma EN 12580 como descrito no documento *Solid materials – Determination of bulk density (2005)*.

6.7.1. Material e equipamentos

- Proveta de 1000 mL;
- Colher grande;
- Balança (© 2020 KERN & SOHN GmbH; Modelo: 572; Erro associado de 0,001 g).

6.7.2. Procedimento experimental

Para a realização da massa volúmica retirou-se a tara de a uma proveta de 1000 ml, tendo de seguida aferindo-se a amostra na proveta até aos 1000 ml.

Posteriormente procedeu-se à pesagem e retirou-se ao peso a tara da proveta.

6.7.3. Tratamento dos dados

De modo a ter a massa volúmica recorreu-se à equação seguinte:

Equação 6.4 - Massa volúmica aparente em kg/m³ ou g/l.

$$Massa\ Volúmica\ \left(\frac{kg}{m^3}\ ou\ \frac{g}{l}\right) = \frac{Peso\ (g)}{1\ l}$$

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

7.1. Enquadramento

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados segundo a metodologia exposta, nomeadamente;

- *Informação sucinta sobre a observação imediata do composto “AMARTERRA”, bem como das cinzas de fundo da combustão da biomassa da Central de Biomassa Termoelétrica das Terras de Santa Maria, S.A e,*
- *Os resultados relativos às médias e os desvios-padrão calculados para cada um dos parâmetros mencionados na metodologia assinalada.*

Com base nos resultados obtidos elabora-se a respetiva análise e considerações que se consideram pertinentes.

Os parâmetros e a designação das amostras utilizadas neste trabalho laboratorial constam da tabela seguinte.

Tabela 7.1 - Parâmetros analisados durante a dissertação e nome das amostras.

Parâmetro analisado	Nome das amostras
Granulometria	Cinzas Composto <i>Mistura 1</i> <i>Mistura 2</i> <i>Mistura 3</i>
pH em água	Cinzas Composto <i>Mistura 1</i> <i>Mistura 2</i> <i>Mistura 3</i>
Condutividade elétrica em água	Cinzas Composto <i>Mistura 1</i> <i>Mistura 2</i> <i>Mistura 3</i>
Massa volúmica aparente	Composto <i>Mistura 1</i> <i>Mistura 2</i> <i>Mistura 3</i>
Humidade a 105°C	Cinzas Composto <i>Mistura 1</i> <i>Mistura 2</i> <i>Mistura 3</i>
Matéria volátil a 550 °C	Cinzas Composto <i>Mistura 1</i> <i>Mistura 2</i> <i>Mistura 3</i>
Estabilidade do composto	Composto

7.1.1. Análise empírica

Perante uma observação dos materiais e amostras a utilizar nos procedimentos laboratoriais pretendidos, foi possível fazer de imediato uma caracterização sucinta do composto “AMARTERRA” bem como das cinzas de fundo da combustão da biomassa da central em referência.

7.1.2. Composto “AMARTERRA”

As amostras de composto que se utilizaram possuíam um cheiro ligeiro a amónia, tendo para o efeito sido colocadas num exaustor durante o procedimento, de modo, a ser possível realizar as análises de forma adequada.

Salienta-se que as amostras de composto “AMARTERRA” utilizadas nos procedimentos do trabalho não aparentavam possuir contaminantes prejudiciais para as misturas (percentuais) com as cinzas de fundo resultantes da combustão da biomassa, verificando-se que a sua estrutura granulométrica era consideravelmente granular.

Na figura 7.1. podem observar-se as amostras do composto “AMARTERRA” utilizadas nos ensaios realizados, antes da sua afinação.



Figura 7.1 - Amostras de composto da “Amarterra” (Fotos tiradas pela autora).

7.1.3. Cinzas de fundo ou escórias

As cinzas da combustão da biomassa possuem diferentes características em face do processo de combustão da central onde são recolhidas, a saber:

- As cinzas de fundo (ou escórias) são constituídas maioritariamente por sílica (Si), embora também apresentem uma quantidade significativa de outros nutrientes tais como magnésio, potássio, fósforo e manganês (Steenari, Karlsson & Lindqvist, 1999);

- As cinzas volantes são constituídas essencialmente por materiais inorgânicos, que são transportados pelo fluxo gasoso durante a combustão de biomassa para sistemas de despoeiramento, nomeadamente precipitadores eletrostáticos, localizados na saída da chaminé, onde os gases de combustão são libertados (Hernández *et al.*, 1998 como citado por Sequeira, 2013), possuindo elevadas concentrações de metais pesados, tais como o chumbo, cádmio, crómio, prata, etc.

Neste trabalho utilizaram-se apenas as cinzas de fundo pelo facto da presença de metais pesados na sua composição ser diminuta e desprezável, ao contrário das cinzas volantes.

As cinzas de fundo utilizadas apresentaram-se com um grau de humidade elevado, bem como algumas frações de inqueimados que, no entanto, não apresentavam um odor desagradável.

Na figura 7.2. pode observar-se o aspeto que as cinzas de fundo apresentavam antes da sua crivagem para se proceder à mistura em 10%, 20% e 30% com o composto “AMARTERRA” fornecido pela AMARSUL, S.A.



Figura 7.2 - Cinzas de fundo da combustão de biomassa (Foto da autora).

7.1.4. Amostras das misturas de cinzas de fundo com composto “AMARTERRA”

Na figura 7.3. podem observar-se as três amostras que se realizaram para os ensaios de misturas com as cinzas de fundo e o composto “AMARTERRA” em diferentes percentagens:

- **Mistura 1:** Composto 90% e cinzas de fundo 10%.
- **Mistura 2:** Composto 80% e cinzas de fundo 20%.
- **Mistura 3:** Composto 70% e cinzas de fundo 30%.



Mistura 1- (10%)

Mistura 2 – (20%)

Mistura 3 – (30%)

Figura 7.3 - Mistura de cinzas de fundo com o composto: *mistura 1*, *mistura 2* e *mistura 3* (Foto tirada pela autora).

7.1.5. Parâmetros analisados

Em primeiro lugar importa evidenciar que a adição de cinzas de fundo com o composto levou a uma diminuição do odor a amoníaco, bem como, a um ligeiro aumento no tom acastanhado do composto.

As cinzas de fundo de biomassa, têm sido adicionadas como aditivo à fração orgânica, antes do processo de compostagem, para minimizar maus odores e por este apresentar características idênticas ao carbono ativado (Koivula *et al.*, 2004; Kurola *et al.*, 2011; Rosenfeld *et al.*, 2004).

Na figura 7.3 denota-se que a *mistura 3* é ligeiramente mais escura, do que a *mistura 1*, sendo o tom de castanho quase idêntico entre a *mistura 1* e a *mistura 2*.

No composto ou nos solos quanto mais escura é o castanho mais matéria orgânica este possui, no entanto, esta cor é devido à cor escura das cinzas de fundo, não se podendo muitas vezes associar diretamente à quantidade de matéria orgânica presente no composto.

- **Determinação da estabilidade do composto**

A elevação da temperatura é um indicativo do equilíbrio microbiológico, pelo que a avaliação da maturidade de compostos orgânicos deve ser realizada, associando-se vários parâmetros já que a degradação das frações orgânicas depende da origem e, da composição da mistura inicial compostada.

No caso em estudo, o composto AMARTERRA utilizado revelou, através do teste do auto-aquecimento ao longo de 10 dias, uma temperatura máxima de 57 °C. Recorrendo ao Quadro 6 do Decreto-lei nº 103/2015 conclui-se que a categoria de matéria fertilizante corresponde a “fresca de grau I e II”, explicando o odor ligeiramente a amoníaco.

As experiências conduzidas por Asquer *et al.* (2017), Koivula *et al.*, 2004; Kuba *et al.* (2008) e Ricardo *et al.* (2014) indicavam uma baixa maturação, tendo evidenciado que seria necessário mais tempo para esgotar o substrato do processo de compostagem.

- **Distribuição de partículas por dimensão (Granulometria)**

Em qualquer uma das amostras analisadas e em conformidade com os resultados que se obtiveram e constam na tabela 7.2, verifica-se que não existem partículas de dimensão “*acima de 25 mm*”.

Tabela 7.2 - Distribuição percentual por dimensão das partículas.

Dimensão das partículas (mm)	Distribuição das partículas (%)				
	Cinzas	Composto	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
Acima de 25	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25 a 12,5	1,50%	0,01%	0,28%	0,50%	0,17%
12,5 a 6,3	10,16%	4,35%	2,84%	3,87%	6,22%
6,3 a 2	74,58%	27,70%	31,12%	34,32%	56,42%
Abaixo de 2	1,53%	67,95%	65,67%	62,34%	38,28%

- *Nas cinzas de fundo é possível observar que a maioria das partículas têm uma dimensão que se situa na gama de “6,3 a 2 mm” seguida de “12,5 a 6,3 mm”, com uma menor percentagem na gama de “25 mm a 12,5 mm” e, na de “Abaixo de 2 mm”.*
- *O composto apresenta a sua maior distribuição nas partículas abaixo da dimensão de 6,3 mm. Na dimensão de “25 a 12,5 mm” as partículas representam uma quantidade desprezável.*
- *Relativamente à mistura 1, esta possui a maior distribuição na gama de “6,3 mm” e “abaixo de 2 mm”.*
- *Em qualquer uma das amostras não existem partículas de dimensão “Acima de 25 mm”.*
- *Os resultados nas cinzas de fundo foram obtidos sobre as amostras crivadas a 25 mm.*

Já no caso do composto, a granulometria obtida resulta do facto de este ser obtido na zona de pós-compostagem após a afinação que ocorre na última etapa do processo de compostagem da Central de Setúbal.

No gráfico seguinte que se elaborou com base nos dados da tabela 7.2 (dados tratados nas tabelas V.3., V.4., V.5. V.6. e V.7. do anexo V), torna-se visível a relação granulométrica das partículas por dimensão, em cada uma das misturas.

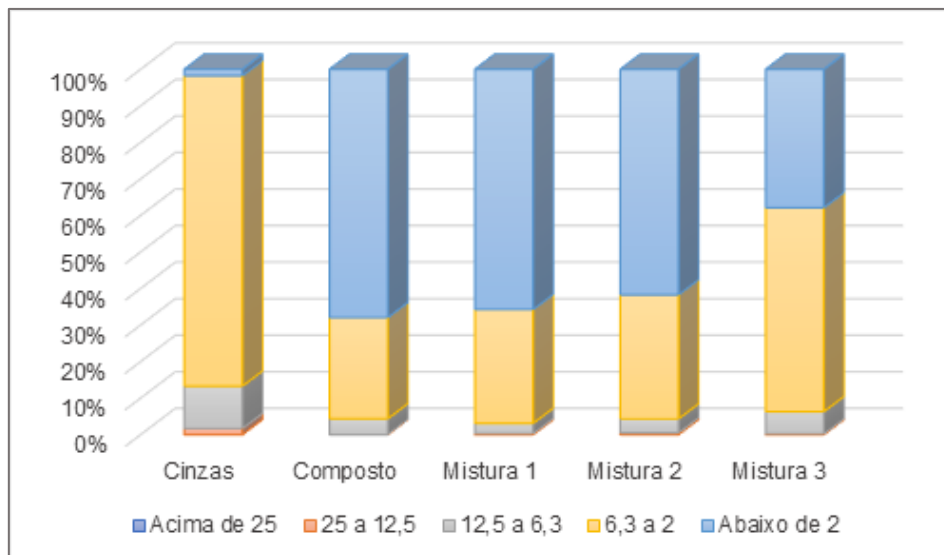


Figura 7.4 - Distribuição da granulometria para as cinzas de fundo, composto e misturas 1,2 e 3.

As cinzas de fundo possuem a sua maior distribuição de “6,3 a 2 mm”, ao passo que o composto, apresenta na dimensão “abaixo de 2 mm”.

Com o aumento das cinzas de fundo nas misturas as partículas de dimensão de “6,3 a 2 mm” aumentaram.

De um modo geral, as características granulometrias das misturas mantiveram-se idênticas às do composto, sendo a *mistura 3* a que apresenta maiores diferenças devido à adição de cinzas de fundo.

Segundo o Decreto-lei nº 103/2015, as misturas efetuadas cumprem a dimensão definida de granulometria que é abaixo de 25 mm.

- **pH (H₂O)**

Na tabela 7.3. apresentam-se os resultados obtidos através da medição do pH em água:

Tabela 7.3 - pH das cinzas de fundo, composto e das misturas 1, 2 e 3.

Amostras	pH em água
Cinzas	10,43
Composto	8,02
Mistura 1	8,34
Mistura 2	8,30
Mistura 3	8,53

O pH determinado para as cinzas de fundo é da ordem dos 10, que se encontra dentro dos valores reportados para os lixiviados por Vassilev *et al.* (2015).

No caso do composto obteve-se o valor de 8.

A contribuição das cinzas de fundo para a mistura fez aumentar ligeiramente o pH à medida que esta quantidade aumenta, indo ao encontro do que Asquer *et al.* (2017) e Kuba *et al.* (2008), reportam, embora a metodologia seja distinta.

A *mistura 3* demonstrou ter um pH de 8,53, sendo este o valor o mais elevado que se obteve no ensaio, sendo também a mistura que possui maior quantidade de cinzas de fundo (30% p/p).

Com base nos dados da tabela 7.3, elaborou-se o gráfico seguinte onde é visível o efeito no pH, em função da mistura percentual [*cinzas de fundo-composto*] que se adotou.

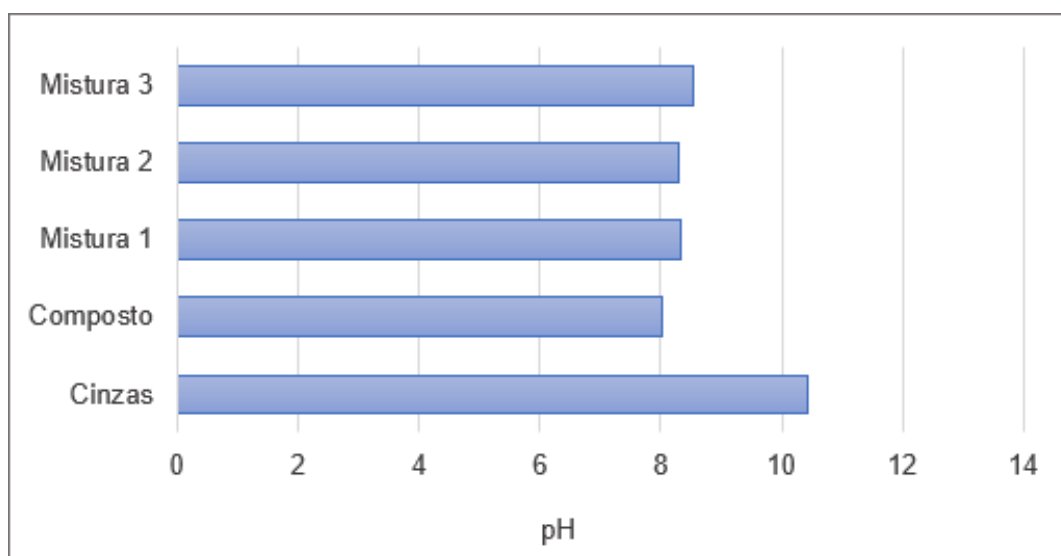


Figura 7.5 – pH em água do composto, cinzas de fundo. *mistura 1*, *mistura 2* e *mistura 3*.

Deste modo é possível concluir que sendo o composto para aplicação em solos, o pH deste será benéfico ou prejudicial dependendo do pH do solo a ser incorporado.

Bougnom *et al.* (2010), utilizou composto com cinzas de fundo como aditivo cujo pH era de 8,59, demonstrando mais valias quando este era incorporado em solos de carácter ácido tropical.

Kuba *et al.* (2008), confirma que o efeito da adição de fertilizantes ao solo pode elevar o pH, no entanto, não observou este efeito associado à adição das cinzas de fundo de biomassa especulando que o processo de compostagem neutralize consideravelmente o pH.

No caso de Kuba *et al.* (2008), as cinzas de fundo da biomassa possuem um pH na ordem dos 12,3. O efeito anteriormente descrito não se verifica devido à adição das cinzas de fundo no composto ser posterior à compostagem.

O efeito destes compostos orgânicos em solos de carácter ácido em Portugal Continental que se encontram numa gama de pH de 4,5 a 5,5 constitui uma interessante pesquisa a ser realizada.

As misturas também cumprem o estabelecido no decreto-lei nº 103/2015 para o pH (5,5 a 9,0).

- **Condutividade elétrica a 25°C**

Relativamente à condutividade elétrica obtiveram-se os valores que constam na tabela seguinte:

Tabela 7.4 - Análise ao parâmetro da condutividade elétrica a 25°C.

Amostras	Condutividade elétrica (mS/cm)
Cinzas	0,906
Composto	4,260
<i>Mistura 1</i>	3,471
<i>Mistura 2</i>	3,344
<i>Mistura 3</i>	2,779

Verifica-se que a condutividade elétrica diminuiu da *mistura 1* para a *mistura 3*, sendo a condutividade elétrica das cinzas de fundo muito baixa (0,906 mS/cm).

Com base nos dados da tabela 7.4, elaborou-se o gráfico seguinte onde é visível o efeito da condutividade elétrica em função da mistura percentual [*cinzas de fundo-composto*] que se adotou.

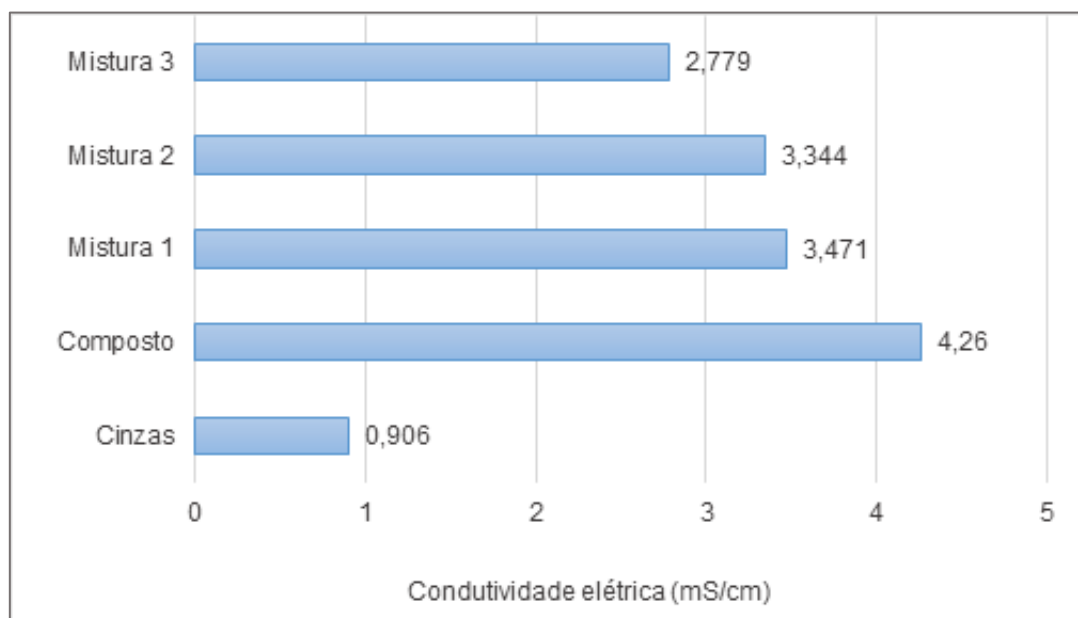


Figura 7.6 - Condutividade elétrica do composto, cinzas de fundo e *mistura 1,2 e 3*.

Nesta metodologia de adição de cinzas de fundo ao composto, após o processo de compostagem, as condutividades elétricas decresceram com o aumento das cinzas de fundo no composto, talvez devido à condutividade elétrica baixa das cinzas de fundo (0,906 mS/cm).

Kuba *et al.* (2008) utilizou cinzas de fundo de biomassa com CE na ordem dos 6,7 mS/cm, observou uma redução na condutividade elétrica, afirmando que a condutividade elétrica ideal se encontra abaixo de 2 mS/cm, embora esse valor não tenha sido atingido no seu estudo não demonstraram ter malefícios para as plantas.

Não existe consenso quanto à CE ideal, existem autores que sugerem que estes valores devem-se encontrar entre 3 mS/cm e 4 mS/cm (Fernández-Delgado Juárez *et al.*, 2015; Koivula *et al.*,

2004), outros sugerem que deve ser abaixo de 1,5 mS/cm (Pfundtner, 1998 citado por Kuba *et al.*, 2008).

No entanto, quando comparado com o comportamento da CE foi observado uma diminuição desta com a adição das cinzas de fundo.

As condutividades elétricas elevadas encontram-se associadas à madeira, quando existe carbonização existe uma redução da solubilidade podendo existir uma diminuição na CE (Oberberger, 1997 citado por Kuba *et al.*, 2008).

Epstein (2011) divide a sensibilidade à salinidade por classes, sendo que a mistura 1, mistura 2 e a mistura 3 (figura 7.6) encontram-se dentro dos valores de condutividade elétrica que afetam culturas mais sensíveis à salinidade.

- **Matéria volátil analisada a 550 °C**

Com a realização deste teste obtiveram-se os valores constantes da tabela 7.5, encontrando-se os dados tratados no anexo V na tabela V.1.

Tabela 7.5 - Análise ao parâmetro da matéria volátil a 550°C.

Amostra	Matéria volátil a 550 °C (%)
Cinzas	37,95 ± 1,17
Composto	39,00 ± 0,99
Mistura 1	34,36 ± 1,03
Mistura 2	32,80 ± 0,41
Mistura 3	30,30 ± 1,42

A sólidos voláteis diminuíram com o aumento das cinzas de fundo de biomassa no composto.

Com efeito, atendendo a que os valores da matéria orgânica nas cinzas de fundo são inferiores e, não existindo qualquer reação à posterior, já seria de esperar um efeito da diluição associado à adição das cinzas de fundo.

Com base nos dados da tabela 7.5, elaborou-se o gráfico seguinte onde é visível o efeito da condutividade elétrica em função da mistura percentual [cinzas de fundo/composto].

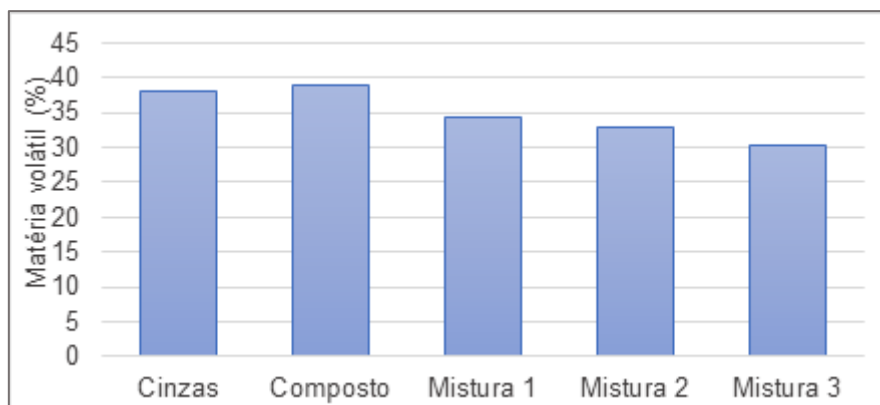


Figura 7.7 - Percentual de matéria volátil nas cinzas de fundo, composto, misturas 1, 2 e 3.

É possível observar que os sólidos voláteis diminuíram à medida que a quantidade de cinzas de fundo na mistura aumentou.

Asquer *et al.* (2017), Fernández-Delgado Juárez *et al.* (2015) e Ricardo *et al.* (2014) associaram nos seus estudos que a diminuição da matéria orgânica era devido ao efeito do pH alcalino que facilitava a degradação da matéria orgânica e a mineralização desta.

Embora o resultado tenha sido idêntico, esta hipótese não poderá ser colocada nesta dissertação, pois não existiu adição durante o processo de compostagem, não existindo influência na biodegradação do composto.

Existindo uma menor quantidade de sólidos voláteis nas cinzas de fundo que foram adicionadas ao composto, foi observado um efeito de diluição desta, reportado por Fernandez Delgado-Juárez *et al.* (2014).

- **Humidade a 105°C**

No anexo V encontram-se os dados tratados na tabela V.2. Na tabela 7.6 constam os valores obtidos nesta análise:

Tabela 7.6 - Análise ao parâmetro da humidade a 105°C.

Amostra	Humidade 105 °C (%)
Cinzas	52,20 ± 0,20
Composto	32,00 ± 1,12
Mistura 1	27,70
Mistura 2	36,20
Mistura 3	39,40

As cinzas de fundo possuíam bastante humidade (52,2%). Com a adição destas ao composto a humidade aumentou devido ao efeito cumulativo.

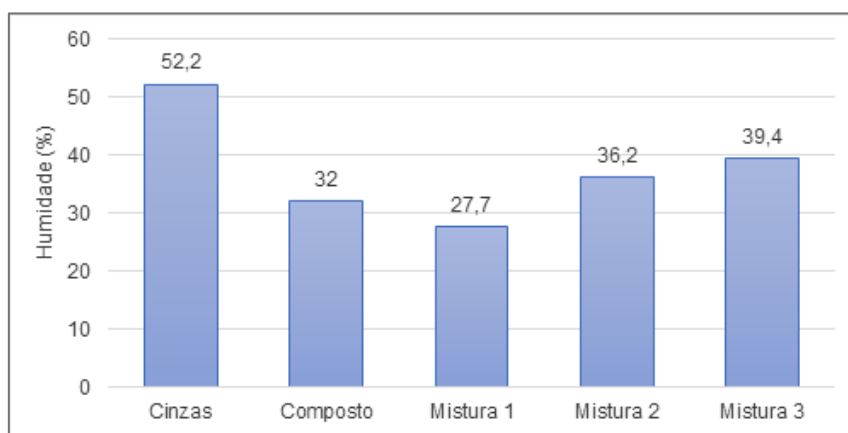


Figura 7.8 - Percentagem de humidade por PMI presente nas cinzas de fundo, composto, *mistura 1*, 2 e 3.

Fernandéz-Delgado Juárez *et al.* (2015) averiguou que a humidade final do composto ficou entre os 43% a 54%, na fase final do processo de compostagem.

Nesta metodologia foi observado que a humidade nas misturas possui um efeito cumulativo com a humidade das cinzas de fundo, como se pode observar na figura 7.8.

Este parâmetro para as misturas, possui valores abaixo de 40% como recomendado no Decreto-lei nº 103/2015 para as matérias fertilizantes.

- **A massa volúmica aparente**

Para a realização da massa volúmica determina-se a tara de uma proveta de 1000 ml. Em seguida afere-se a amostra na proveta até aos 1000 ml. Posteriormente procede-se à pesagem e, retira-se ao peso obtido a tara da proveta.

De seguida encontram-se apresentados os valores medidos para a massa volúmica aparente:

Tabela 7.7 - Resultados do parâmetro da massa volúmica aparente (kg/m³).

Amostras	Massa volúmica aparente (kg/m ³)
Cinzas	n.m.*
Composto	666
Mistura 1	619
Mistura 2	614
Mistura 3	582
AMARSUL	618

*não medido

A massa volúmica aparente diminuiu da *mistura 1* para a *mistura 3*, ou seja, com o aumento das cinzas de fundo na mistura com composto.

Quando comparando a massa volúmica aparente medida na AMARSUL, S.A. e a laboratorial observa-se que a laboratorial é ligeiramente superior.

Tal pode acontecer devido ao facto de laboratorialmente ser medido através do teste da proveta e na AMARSUL, S.A. através de um cilindro calibrado.

Também pode estar associada ao tempo que o composto esteve armazenado até ser realizada a análise, e este ter acumulado humidade aumentando assim o valor medido.

Com base nos dados da tabela 7.7, elaborou-se o gráfico seguinte relativo à massa volúmica determinada.

A massa volúmica aparente das cinzas de fundo não foi medida devido a constrangimentos relacionados com a natureza do produto, nomeadamente a humidade, alguma eletricidade estática e esta tingir os materiais.

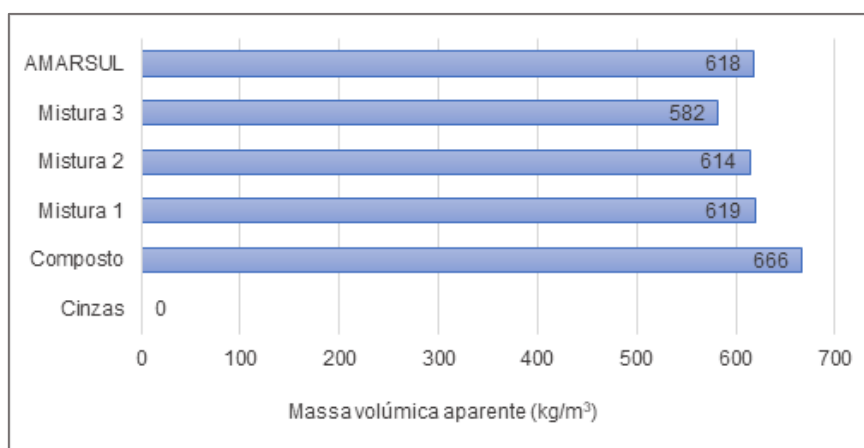


Figura 7.9 - Massa volúmica aparente do composto, AMARSUL, mistura 1, mistura 2 e mistura 3.

A diminuição da densidade aparente da *mistura 1* para a *mistura 3* foi associada à baixa densidade aparente das cinzas de fundo que se encontra entre 80 a 430 kg/m³ (Vassilev *et al.*, 2015). No entanto existem autores que afirmam que não se deve adicionar além de 20% porque a massa específica das cinzas de fundo é elevada (Koivula *et al.*, 2004). Neste caso, revelou-se contrário e o aumento das cinzas de fundo no composto diminuiu consideravelmente a massa volúmica aparente do composto.

• Metais pesados

Como as cinzas de fundo de biomassa eram para ter sido adicionadas na fração orgânica de modo a compreender a influência destas no processo de compostagem e nas características finais do composto, na tabela 7.9 comparam-se com o composto utilizado por Kuba *et al.* (2008), assim como os resultados obtidos.

Tabela 7.8 – Comparação entre os metais pesados nas cinzas de fundo e no composto “AMARTERRA” utilizado nas análises e o utilizado nos ensaios de Kuba *et al.* (2008).

Parâmetro (mg/kg m.s.)	Composto AMARTERRA	Composto (Kuba <i>et al.</i> , 2008)	Cinzas de fundo	Cinzas (Kuba <i>et al.</i> , 2008)
Cádmio (Cd)	2,100	0,8	< 0,003	1,40
Chumbo (Pb)	85,000	58,0	< 0,010	12,00
Cobre (Cu)	170,000	67,3	< 0,050	92,00
Crómio (Cr)	30,000	25,2	0,230	112,00
Mercúrio (Hg)	0,350	0,4	< 0,002	0,07
Níquel (Ni)	25,000	16,4	< 0,010	46,00
Zinco (Zn)	320,000	181,0	0,100	344,00

Quando comparando o conteúdo de metais pesados nos compostos é possível observar ordenadamente que a quantidade de cádmio, cobre, zinco, níquel, chumbo e crómio no composto “AMARTERRA” é 2,5 a 1,2 vezes superior à reportada por Kuba *et al.* (2008). Quanto ao mercúrio no composto “AMARTERRA” este valor é 1,1 vez inferior. Quando comparando com as cinzas de fundo utilizadas por Kuba *et al.*, (2008), pode-se observar que os valores dos metais pesados

das cinzas de fundo utilizadas nos ensaios, estas apresentam-se 4600 a 450 vezes inferiores para todos os parâmetros.

A adição de cinzas de fundo de 8% e 16% de cinzas de fundo ao composto, antes do processo de compostagem, demonstrou que a quantidade de crómio, níquel e zinco aumentou na mistura, contrariamente ao chumbo, cádmio, cobre e mercúrio (Kuba *et al.*, 2008).

Quanto ao efeito que a adição deste ao composto pode ter sobre as culturas, a adição de 2%, 4% e 6% de cinzas de fundo em composto, antes da compostagem, revelou um aumento dos metais pesados como o mercúrio, níquel, zinco e cobre, especulou-se devido à quantidade presente nas cinzas de fundo utilizadas para o estudo (Asquer *et al.*, 2017).

No entanto, quanto à quantidade solúvel destes elementos com o aumento das cinzas de fundo, observou-se uma diminuição para o zinco que não foi possível relacionar ao aumento das cinzas de fundo no composto (Asquer *et al.*, 2017). Quanto ao crómio, este encontrou-se abaixo do limite detetável na fração solúvel e o mercúrio não foi medido (Asquer *et al.*, 2017).

O aumento do pH devido à adição de cinzas de fundo facilitou a solubilização das frações do cobre e do níquel no composto (Asquer *et al.*, 2017).

É importante salientar que o cobre possui afinidade para a matéria húmica (Adekunle, 2009 citado por Asquer *et al.*, 2017), sendo esta tanto maior quanto mais elevado o pH (Kipton *et al.* 1992 citado por Asquer *et al.*, 2017).

Kuba *et al.* (2008) desenvolveu ensaios de germinação, não tendo sido observadas diferenças entre a adição de cinzas de fundo em 0%, 8% e 16%, sendo que a adição de 8% foi o que obteve o verde mais vivo das culturas.

A adição de cinzas de fundo de biomassa contribuiu para subir para a classe do composto de A para A+, segundo a *Austrian Compost Ordinance* (2002) que possui limites para chumbo, cobre e o mercúrio mais restritivos do que os implementados em Portugal (tabela 7.9).

Tabela 7.9 - Valores limite por classe de fertilizante orgânico para a agricultura na Áustria e em Portugal.

Parâmetro (mg/kg m.s.)	Classe de matéria fertilizante para a agricultura					
	Áustria			Portugal		
	A+	A	B	I	II	IIA
Cádmio (Cd)	0,7	1,0	1,0	0,7	1,5	3
Chumbo (Pb)	45,0	120,0	200,0	100,0	150,0	300
Cobre (Cu)	70,0	170,0	170,0	100,0	200,0	400
Níquel (Ni)	70,0	150,0	150,0	50,0	100,0	200
Mercúrio (Hg)	0,4	0,7	0,7	0,7	1,5	3
Zinco (Zn)	200,0	500,0	500,0	200,0	500,0	1000

Os resultados demonstraram, que a adição de cinza de biomassa no composto, possui mais valias na imobilização de alguns metais (Neaman *et al.*, 2012), tendo em atenção que o aumento do pH disponibiliza o cobre.

Os metais pesados constituíam uma das análises a ser realizadas para as misturas. No entanto devido à inviabilidade da amostra durante a digestão ácida não foi possível a realização desta. Todavia na tabela 7.8 discrimina-se um balanço de massa sem reação.

Tabela 7.10 – Análise aos metais pesados através de balanço de massas sem reação.

Parâmetro (mg/kg m.s.)	Composto AMARTERRA	Cinzas de fundo	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
Cádmio (Cd)	2,1	0,003	1,8903	1,68	0,569
Chumbo (Pb)	85	0,01	76,501	68,00	22,957
Cobre (Cu)	170	0,05	153,005	136,01	45,937
Crómio (Cr)	30	0,23	27,023	24,04	8,268
Mercúrio (Hg)	0,35	0,002	0,3152	0,28	0,096
Níquel (Ni)	25	0,01	22,501	20,00	6,757
Zinco (Zn)	320	0,1	288,01	256,02	86,473

Analisando a tabela 7.8. e atendendo a que o procedimento não possui qualquer reação é possível observar que a mistura 3 estabelece-se na classe I dos metais pesados de acordo com os limites estabelecidos no decreto-lei nº 103/2015 apresentados na tabela 7.9.

- **Corretivo orgânico “RICATERRA”- ETVO da VALORSUL**

Apenas a título comparativo faz-se referência neste ponto do estudo, ao corretivo orgânico RICATERRA porque é obtido pelo tratamento biológico de resíduos urbanos biodegradáveis provenientes de recolha seletiva (e *não da recolha indiferenciada de RU como o caso do AMARTERRA*) na restauração, hotelaria, mercados retalhistas e abastecedores entre outros, produzido na Estação de Tratamento e Valorização Orgânica (ETVO) da Valorsul.

Os resíduos verdes de jardins são também adicionados ao processo, que se dá em condições controladas e recolhidos na região de Lisboa e do Oeste.

É um corretivo orgânico pertencente ao grupo 5, do tipo composto orgânico de Classe II-A a utilizar apenas em culturas arbóreas e arbustivas, nomeadamente pomares, olivais, vinhas e espécies silvícolas com forma de apresentação do produto em pó.

Este corretivo orgânico para além da matéria orgânica possui teores de macro e micronutrientes bastante significativos o pode permitir a redução ou isenção de utilização de fertilizantes químicos.

Possui azoto fundamentalmente na forma orgânica o que permite a libertação para o solo de forma lenta e consequentemente melhor aproveitamento.

Analisando o conteúdo de metais pesados neste corretivo orgânico, produzido na ETVO da Valorsul com base em recolha seletiva de biorresíduos e resíduos verdes, e comparando com o composto AMARTERRA proveniente de recolha de resíduos urbanos indiferenciados, verifica-se que o conteúdo em metais pesados é inferior, com exceção do crómio e do zinco.

Tabela 7.11 - Tabela comparativa de um composto de TMB e recolha seletiva (Fonte: Tabela VI.1 do anexo VI).

Parâmetro (mg/kg m.s.)	Composto AMARTERRA	Composto RICATERRA
Cádmio (Cd)	2,10	1,90
Chumbo (Pb)	85,00	22,00
Cobre (Cu)	170,00	102,00
Crómio (Cr)	30,00	39,00
Mercúrio (Hg)	0,35	0,27
Níquel (Ni)	25,00	16,00
Zinco (Zn)	320,00	350,00

Analisando agora os dois tipos de composto no particular dos metais pesados, tendo em conta a classificação de matérias fertilizantes para a agricultura em Portugal, verifica-se que o produzido por RUB de recolha seletiva também tem condicionada a sua classificação conforme se pode observar na tabela 7.11.

Tabela 7.12 - Tabela comparativa do composto "AMARTERRA" e "RICATERRA" em comparação com a legislação em vigor para os metais pesados.

Parâmetro (mg/kg m.s.)	Composto AMARTERRA	Composto RICATERRA	I	II	IIA
Cádmio (Cd)	2,10	1,90	0,7	1,5	3,0
Chumbo (Pb)	85,00	22,00	100,0	150,0	300,0
Cobre (Cu)	170,00	102,00	100,0	200,0	400,0
Crómio (Cr)	30,00	39,00	-	-	-
Mercúrio (Hg)	0,35	0,27	50,0	100,0	200,0
Níquel (Ni)	25,00	16,00	0,7	1,5	3,0
Zinco (Zn)	320,00	350,00	200,0	500,0	1000,0

O RICATERRA® é um produto maturado, higienizado e isento de sementes ou propágulos de plantas infestantes, colocado no mercado com o n.º de inscrição do Registo de matérias fertilizantes não harmonizadas 260/2018, ao abrigo do Decreto-Lei n.º 103/2015, de 15 de junho.

Neste particular e, em futuros trabalhos nesta área, poderá este corretivo orgânico proveniente de recolha seletiva de resíduos biodegradáveis/biorresíduos *(que irá ser uma obrigação em Portugal a partir de 2023 em conformidade com as exigências e metas impostas a Portugal pela revisão da Diretiva Quadro de Resíduos)* ser objeto de estudo específico - *com a adição de cinzas de fundo com o corretivo orgânico RICATERRA* - para avaliação dos respetivos resultados.

7.1.6. Síntese global

Com base nos dados obtidos nos ensaios laboratoriais das amostras de mistura realizados, apresenta-se na figura seguinte a respetiva síntese para os diferentes parâmetros analisados.

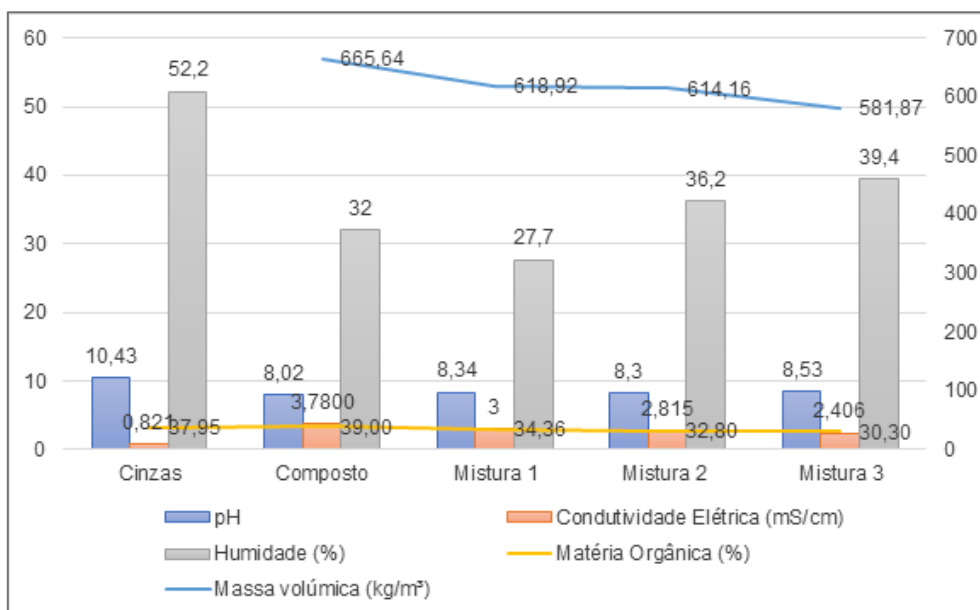


Figura 7.10 - Síntese dos dados obtidos nos ensaios laboratoriais.

Assinala-se também que para este estudo foram selecionadas para as amostras das misturas realizadas com o composto, apenas as cinzas de fundo fornecidos pela Central Termoeléctrica das Terras de Santa Maria. Esta opção ficou a dever-se ao facto de, após se analisarem os boletins das análises das cinzas de fundo e volantes, verificou-se que as cinzas volantes não seriam apropriadas para a utilização agronómica (*mesmo que misturadas com composto*) dado possuírem concentrações relativamente elevadas de BTEX (*grupo de compostos formado por hidrocarbonetos*) e em especial de PAHs (*hidrocarboneto aromático policíclico*), bem como elevada presença de metais pesados.

Asquer *et al.* (2017), Kuba *et al.* (2008) e Kurola *et al.* (2011) que conduziram estudos de adição de cinzas de fundo ao composto, também aconselham as cinzas de fundo por terem menor quantidade de metais pesados e à presença de magnésio, cálcio e potássio na sua composição, quando comparado com as cinzas volantes.

Os aspetos mais significativos a reter:

- O aumento da cor castanha não foi relacionado com o aumento de matéria orgânica nas misturas, mas sim devido à cor das cinzas de fundo ser escura, pois a quantidade de matéria orgânica decresceu com o aumento das cinzas de fundo de fundo.
- A diminuição do odor a amoníaco após a adição de cinzas de fundo foi anteriormente reportada para uma metodologia distinta, devido às propriedades das cinzas de fundo serem comparáveis às dos filtros de carbono ativado.

- O teste do auto-aquecimento realizado pretendia clarificar a maturação do composto da amostra encontrando-se na categoria “*fresca de grau I e II*”, devido ao cheiro a amoníaco da amostra.
- Observou-se um ligeiro aumento do pH entre a *mistura 1-mistura 3* e a *mistura 2-mistura 3*, não existindo uma diferença significativa entre a *mistura 1-mistura 2*. Este aumento no pH foi associado ao carácter alcalino das cinzas de fundo.
- A condutividade elétrica decresceu com o aumento das cinzas de fundo de biomassa, em que a *mistura 3* pode ser aplicada inclusivamente em culturas mais sensíveis à salinidade (Epstein, 2011).
- Os valores analisados na *mistura 1* e a *mistura 2*, encontram-se dentro dos valores recomendados por alguns autores para a condutividade elétrica em composto para adicionar a culturas menos sensíveis à salinidade (Epstein, 2011).
- Os sólidos voláteis nas misturas diminuíram à medida que se aumentou as cinzas de fundo de biomassa no composto, tendo sido associado ao efeito de diluição.
- Adicionalmente, o conhecimento das características das cinzas de fundo de biomassa a incorporar é extremamente importante devido às suas características bastante heterogéneas e à presença de metais pesados nas mesmas (Asquer *et al.*, 2017; Kuba *et al.*, 2008; Kurola *et al.*, 2011).
- Mesmo com a adição das cinzas de fundo, o composto cumpriu os parâmetros estabelecidos no Anexo II do Decreto-lei nº 103/2015 para a granulometria, o pH, a humidade e a matéria orgânica.
- Observando o boletim das cinzas de fundo de biomassa (presente no anexo I na tabela II.1 e na tabela 6.8) é possível constatar que as cinzas de fundo possuem baixas quantidades de metais pesados, não constituindo um inibidor à utilização deste como aditivo no composto orgânico.

Neste sentido e perante os factos anteriormente reportados, e sendo o cádmio o elemento crítico para a categoria do composto “AMARTERRA” ser de classe II, com a devida adição das cinzas de fundo de biomassa, existe a possibilidade de um efeito de diluição diminuir o cádmio, podendo inclusivamente estabelecer-se na classe I.

8. CONCLUSÕES

Pretendendo-se avaliar e discutir os resultados da cadeia de valor da solução inovadora resultante da mistura em diferentes percentagens de [*cinzas de fundo + composto orgânico*] para a obtenção de um produto final melhorado que pudesse permitir a valorização das cinzas de fundo e uma melhoria da qualidade do composto (em resposta aos objetivos da Economia Circular), colocaram-se desde logo questões de investigação que pudessem suscitar respostas com a avaliação dos resultados dos ensaios laboratoriais realizados. As questões que se suscitaram inicialmente foram as seguintes:

- ✓ Com a adição de cinzas de fundo ao composto, o pH aumenta?
- ✓ Quanto mais cinzas de fundo forem adicionadas, maior será a humidade do composto?
- ✓ A salinidade no composto aumentará com a adição das cinzas de fundo?
- ✓ A adição de cinzas de fundo não irá aumentar os metais pesados face ao composto original?
- ✓ A massa volúmica aumentará com o aumento das cinzas de fundo no composto?
- ✓ A matéria orgânica diminuirá com o aumento das cinzas de fundo no composto?

As respostas obtidas são as seguintes:

1 - Com a adição de cinzas de fundo ao composto, o pH aumenta?

Sim.

O aumento da quantidade de cinzas de fundo adicionadas ao composto revelou um aumento no pH. Tal acontece devido ao efeito cumulativo das cinzas de fundo com carácter alcalino (10,43), sendo que o pH mais alto a ser registado foi o da *mistura 3* que constitui 8,53.

2 - Quanto mais cinzas de fundo forem adicionadas, maior será a humidade do composto?

Sim.

Com a adição das cinzas de fundo a humidade no composto aumentou de 27,7% para 36% (*mistura 3*) devido à humidade presente nas cinzas de fundo ser superior à humidade do composto.

3 - A salinidade no composto aumentará com a adição das cinzas de fundo?

Não.

Com base nos resultados de alguns dos autores consultados, seria de esperar que a condutividade e por consequência a salinidade do composto aumentassem com a adição das cinzas de fundo. No entanto, esta hipótese revelou-se falsa.

A condutividade elétrica das cinzas de fundo utilizadas revelou ser 0,906 mS/cm, sendo a condutividade do composto de 4,260 mS/cm.

Com a adição das cinzas de fundo ao composto verificou-se um decréscimo deste parâmetro.

A condutividade elétrica elevada foi associada à biomassa que está em linha com referido por autores referenciados na revisão de literatura. Quando ocorre carbonização esta decresce devido à solubilização.

Assim aceita-se que este parâmetro tenha decrescido pelo facto das cinzas de fundo utilizadas não possuírem praticamente inqueimados.

4 - A adição de cinzas de fundo não irá aumentar os metais pesados face ao composto original?

Sim.

As cinzas de fundo fornecidas pela central de biomassa para os ensaios laboratoriais revelavam, com base nos boletins de análise, uma quantidade muito baixa de metais pesados.

Este facto tem demonstrado (em linha com o descrito na revisão de literatura) ser vantajoso aquando da adição das cinzas de fundo de fundo, pois ocorre um efeito de diluição/incorporação nestes parâmetros, decisivos para a qualidade final do composto. Com base numa análise teórica demonstrou-se que nas experiências na qual as cinzas de fundo possuem baixa quantidade de metais pesados (como é o caso das cinzas utilizadas), este fator foi determinante para a subida da classe do composto.

O composto em questão possui uma quantidade de cádmio que o colocam na classe II de matérias fertilizantes, pelo que a adição de cinzas de fundo pode diminuir este parâmetro assim como os restantes e, aumentar a qualidade para a classe I.

5 - A massa volúmica aumentará com o aumento das cinzas de fundo no composto?

Não.

Após a execução das análises às misturas foi possível concluir que a massa volúmica diminuiu com o aumento das cinzas de fundo no composto de 666 kg/m³ para 582 kg/m³ na *mistura 3*. Deduz-se que tal ocorreu devido à baixa massa volúmica aparente das cinzas de fundo, fato também corroborado por autores referenciados na revisão de literatura.

6 - A matéria orgânica diminuirá com o aumento das cinzas de fundo no composto?

Sim.

As análises demonstraram uma diminuição da matéria orgânica com o aumento das cinzas de fundo na mistura de 39% para 30,3% (*mistura 3*). Os autores obstantes na revisão de literatura possuem resultados idênticos, no entanto, devido à mistura das cinzas de fundo ao composto ser posterior à fase de maturação da compostagem, não se pode incluir a hipótese de a adição das cinzas de fundo ter melhorado a biodegradação do composto.

Adicionalmente, outros parâmetros de natureza empírica foram testados como a cor e o odor.

- *O escurecimento da cor castanha, não foi devido ao aumento da matéria orgânica, mas à cor escura das cinzas de fundo, pois na análise realizada aos sólidos voláteis, o aumento das cinzas de fundo no composto diminuiu esta.*
- *A granulometria demonstrou ser idêntica à do composto, tendo a mistura 3 uma granulometria mais distinta do composto, também devido ao efeito da adição das cinzas de fundo.*
- *Quanto à análise do odor esta demonstrou uma relativa diminuição do odor do composto à medida que se adicionaram as cinzas de fundo.*

Acresce ainda que a adição de cinzas de fundo possui ainda outros benefícios relacionadas com:

- *O enriquecimento do magnésio, do cálcio e do fósforo, normalmente com baixas quantidades nos fertilizantes orgânicos. Tal permite, o escoamento futuro de um produto com aplicação e maior no mercado dos fertilizantes orgânicos.*
- *Além disso, existem aspetos difíceis de controlar como o pH demasiado baixo no início do processo de compostagem decisivos para a biodegradabilidade do composto. A utilização destas cinzas de fundo de biomassa à priori do processo de compostagem, revelou melhoria na eficiência do ponto de vista de performance do processo de compostagem devido ao seu efeito tampão relacionado com a alcalinidade das cinzas de fundo.*

É importante referir que as cinzas de fundo de biomassa já foram anteriormente adicionadas a solos florestais, de modo a equilibrar os nutrientes nestes solos e fechar o ciclo de nutrientes. Outros fatos importantes que se concluem são;

- *Fica demonstrado que as mais valias da adição das cinzas de fundo de biomassa ao composto também se podem verificar na fase de pós- compostagem.*
- *A recolha seletiva de biorresíduos demonstra mais valias na melhoria da qualidade do composto, em aspetos como os inertes e os metais pesados. (ver em anexo boletim RICATERRA -Valorsul)*

Considera-se por fim que o trabalho desenvolvido pode abrir caminho para uma nova cadeia de valor, permitindo a valorização e o escoamento das cinzas de fundo das centrais de biomassa enquanto recurso económico e ambiental (ainda pouco aproveitado), bem como a possibilidade de melhorar a qualidade final do composto produzido com base na fração biodegradável dos resíduos urbanos provenientes de recolha indiferenciada.

Dada a importância de se encontrarem alternativas para a valorização de resíduos no caminho de uma Economia Circular, considera-se esta alocação de recursos mistos um investimento que a médio prazo possui muito interesse.

CONCLUSÕES - Síntese

CONCLUSÃO	COMENTÁRIO	NOTA
Com o aumento da quantidade de cinzas adicionadas ao composto, o pH aumenta.	Especula-se que tal acontece devido ao efeito cumulativo das cinzas com carácter alcalino (10,43), sendo que o pH mais alto a ser registado foi o da mistura 3 que constitui 8,53. O pH foi um dos primeiros parâmetros a ser estudados, concluindo-se que o mesmo influência a quantidade de metais pesados disponíveis no composto e nos solos.	
Quanto mais cinzas forem adicionadas, maior será a humidade do composto	Com a adição das cinzas a humidade no composto aumentou de 27,7% para 36% devido à humidade presente nas cinzas ser superior à do composto.	
A salinidade no composto não aumenta com a adição das cinzas	Com base nos resultados de alguns dos autores consultados, seria de esperar que a condutividade e por consequência a salinidade do composto aumentassem com a adição das cinzas. No entanto, esta hipótese revelou-se falsa. A condutividade elétrica das cinzas de fundo utilizadas revelou ser 0,906 mS/cm, sendo a condutividade do composto de 4,260 mS/cm. Com a adição das cinzas ao composto verificou-se um decréscimo deste parâmetro.	A condutividade elétrica elevada foi associada à biomassa, no entanto quando ocorre carbonização esta decresce devido à solubilização. Assim, se biomassa utilizada não possuir praticamente inqueimados, este parâmetro espera-se que seja baixo.
A adição de cinzas não irá aumentar os metais pesados face ao composto original	As cinzas de fundo fornecidas pela central de biomassa para os ensaios laboratoriais revelavam, com base nos boletins de análise, uma quantidade muito baixa de metais pesados. em linha com a revisão de literatura ser vantajoso quando da adição das cinzas de fundo, pois ocorre um efeito de diluição nestes parâmetros, decisivos para a qualidade final do composto. Com base numa análise teórica demonstrou-se que nas experiências na qual as cinzas possuem baixa quantidade de metais pesados (como é o caso das cinzas utilizadas), este fator foi determinante para a subida da classe do composto.	O composto em questão possui uma quantidade de cádmio que o colocam na classe II de matérias fertilizantes, pelo que a adição de cinzas pode diminuir este parâmetro e, aumentar a qualidade para a classe I.
A massa volúmica não aumenta com o aumento das cinzas no composto	Após a execução das análises às misturas foi possível concluir que a massa volúmica diminuiu com o aumento das cinzas no composto, possivelmente devido à baixa massa volúmica aparente das cinzas, fato também corroborado por autores referenciados na revisão de literatura.	
O escurecimento da cor castanha, não foi devido ao aumento da matéria orgânica, mas à cor escura das cinzas	pois na análise realizada aos sólidos voláteis, o aumento das cinzas no composto diminuiu esta.	Quanto à análise do odor esta demonstrou uma relativa diminuição do odor do composto à medida que se adicionaram as cinzas.
A granulometria que demonstrou ser idêntica à do composto	A mistura 3 teve uma granulometria mais distinta do composto, também devido ao efeito da adição das cinzas.	
O enriquecimento do magnésio, do cálcio e do fósforo, normalmente com baixas quantidades nos fertilizantes orgânicos.	Tal permite, o escoamento futuro de um produto com aplicação e maior no mercado dos fertilizantes orgânicos. É importante referir que as cinzas de biomassa já foram anteriormente adicionadas a solos florestais, de modo a equilibrar os nutrientes nestes solos e fechar o ciclo de nutrientes.	
Demonstra-se que as mais valias da adição das cinzas de biomassa ao composto também se pode realizar na etapa pós- compostagem. O composto orgânico resultante do processo biológico de biorresíduos provenientes da recolha seletiva possui melhor qualidade.		

8.1. Principais limitações

Ao longo do desenvolvimento da dissertação surgiram limitações associadas aos constrangimentos impostos pela situação pandémica do COVID-19 a partir de março p.p. A pandemia que se instalou impediu que a pretensão inicial de se efetuar o caso de estudo no início do processo de compostagem, através de pilhas com a mistura das cinzas de fundo, formatadas especificamente para análise durante a fermentação, na maturação e na estabilização.

A dissertação teria sido realizada através do acompanhamento e monitorização do processo no sistema multimunicipal da AMARSUL, S.A. Por razões de saúde pública e critérios de segurança da empresa, tal não foi possível.

Perante esta impossibilidade optou-se por desenvolver a dissertação com base em ensaios laboratoriais sobre amostras compostas de cinzas de fundo e composto, bem como na revisão de literatura com informação técnica relacionada com o processo de compostagem e o tema em avaliação.

O composto utilizado e a informação sobre as suas características (ver boletim em anexo) foi facultado pela responsável da TMB de Setúbal, a Engenheira Maria José Sebastião da AMARSUL S.A. e, as cinzas de fundo de biomassa da Central Termoelétrica de Terras de Santa Maria (ver boletim em anexo), foram facultadas pelo Administrador Engenheiro Carlos Alegria.

O estudo dos metais pesados através de análises por digestão ácida assistida por micro-ondas e posterior análise por ICP-AES (Espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma indutivamente acoplado), à exceção do mercúrio, constituíam uma das componentes a ser avaliada devido à sua importância para potenciais efeitos fitotóxicos nos solos.

No entanto devido à inviabilidade das amostras face à reatividade elevada que ocorreu, bem como o tempo imposto para a realização da dissertação, tal não foi atempadamente conseguido.

8.2. Trabalhos futuros

Esta dissertação deixa algumas questões em aberto, pelo que será importante prosseguir com o objetivo de:

- Consolidar resultados de parâmetros a analisar em novas amostras de misturas, nomeadamente: os metais pesados e seus efeitos, bem como ensaios de germinação para medição da fitotoxicidade.
- Analisar-se o comportamento da mistura de cinzas de fundo em pilhas específicas no início do processo de compostagem. O controlo e monitorização dos efeitos da mistura ao longo do processo de compostagem será fundamental para consolidar uma solução com garantia da qualidade do produto final.
- Investigação do método original com quantidades superiores como alternativa a corretivos de pH no início do processo de compostagem para substratos mais ácidos, como assinalado nesta dissertação.
- Realizar nova investigação com amostras de misturas de composto resultante de processo biológico de biorresíduos provenientes de recolha seletiva com as cinzas de fundo da combustão de biomassa em Centrais Termoelétricas de Biomassa, incluindo as análises aos metais pesados e seus efeitos, bem como ensaios de germinação para medição da fitotoxicidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE (2020, 22 de junho). Energia em números 2020. <https://www.adene.pt/energia-em-numeros-2020-ja-disponivel-para-consulta/>
- APA. (2011). Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2011-2020. https://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Resíduos/Planeamento/PNGR_rev_20141107_clean.pdf
- APA (2018). Relatório Anual Resíduos Urbanos 2018. https://apambiente.pt/_zdata/Políticas/Resíduos/Resíduos_Urbanos/RARU_2018_v2.pdf
- APA (2018). Relatório do Estado do Ambiente 2018. <https://sniambgeoviewer.apambiente.pt/GeoDocs/geoportaldocs/rea/REA2018/REA2018.pdf>
- APA (2019, julho). PERSU 2020+: Reflexão Estratégica e Ajustamentos às medidas do PERSU 2020. https://issuu.com/apambiente/docs/persu2020_
- APA (2019). Relatório Anual Resíduos Urbanos 2019. <https://rea.apambiente.pt/content/ultimaedicao>
- Asquer, C., Cappai, G., De Gioannis, G., Muntoni, A., Piredda, M., & Spiga, D. (2017). Biomass ash reutilisation as an additive in the composting process of organic fraction of municipal solid waste. *Waste Management*, 69(2017), 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.009>
- Azim, K, Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussous, S., Alami, I. T. (2018) Composting parameters and compost quality: a literature review. *Springer Science+Business Media Dordrecht* 2017: 146-152. DOI: 10.1007/s13165-017-0180-z
- Bougnom, B. P., Knapp, B. A., Elhottová, D., Koubová, A., Etoa, F. X., & Insam, H. (2010). Designer compost with biomass ashes for ameliorating acid tropical soils: Effects on the soil microbiota. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.05.009>
- Cabrita-Mendes, A. (2020, Maio). Incêndios reduzem significativamente a biomassa disponível. *Energia & Ambiente*, p 1-2
- Câmara Municipal de Lisboa (2020, 18 de maio). Covid-19 Medidas e Informações. <https://www.lisboa.pt/covid-19-medidas-e-informacoes/a-cidade/higiene-urbana>
- CELPA (2004). Boletim estatístico 2004. <http://www.celipa.pt/boletim-estatistico-da-celipa-de-2004/boletim-estatistico-da-celipa-de-2004/>
- COGEN Europe (2020). EU benefits from cogeneration growth. <https://www.cogeneurope.eu/newsroom/ebulletin/eu-benefits-from-cogeneration-growth>
- E2p (n.d.). Energias endógenas de Portugal. <https://e2p.inegi.up.pt/#Tec2>
- Epstein, E. (1997). *The science of composting*. CRC Press LLC.
- Epstein, E. (2011). *INDUSTRIAL COMPOSTING: Enviromental Engineering and Facilities Management*. CRC Press: Taylor & Francis Group.
- ERSAR (2018). PERSU 2020: Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos 2014-2020. Relatório de Monitorização 2017. Lisboa
- EUROSTAT (2020, 3 de julho) Waste generated. <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

- EUROSTAT (2020, 15 de setembro) Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wastrt/default/table?lang=en
- European Standard (2005). Determination of electrical conductivity in soil, sewage sludge and biowaste. https://horizontal.ecn.nl/docs/society/horizontal/STD5150_EC.pdf
- Fernandes, P. (2015). Estudo da Biomassa Florestal Residual Consumida em Centrais Termoelétricas. [Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa]. Sistema Integrado de Bibliotecas Repositório. <http://hdl.handle.net/10451/18448>
- Guedes, N. (2020, 22 abril). Crise da Covid-19 ameaça matar à fome bactérias que tratam o nosso lixo. TSF Rádio Notícias. <https://www.tsf.pt/portugal/sociedade/crise-da-covid-19-ameaca-matar-a-fome-bacterias-que-tratam-o-nosso-lixo-12103377.html>
- Haug, R. T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Boca Raton, FL: Lewis Publishers
- Jordão, C. P., Nascentes, C. C., Cecon, P. R., Fontes, R. L. F., & Pereira, J. L. (2006). Heavy metal availability in soil amended with composted urban solid wastes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 112(1–3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1072-y>
- Koivula, N., Rääkkönen, T., Urpilainen, S., Ranta, J., & Hänninen, K. (2004). Ash in composting of source-separated catering waste. *Bioresource Technology*, 93(2004), 291–299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.10.025>
- Kuba, T., Tschöll, A., Partl, C., Meyer, K., & Insam, H. (2008). Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127(1–2), 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.02.012>
- Kurola, J. M., Arnold, M., Kontro, M. H., Talves, M., & Romantschuk, M. (2011). Wood ash for application in municipal biowaste composting. *Bioresource Technology*, 102(8), 5214–5220. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.092>
- Loo, S., Koppejan, J. (2008). The handbook of biomass combustion and co-firing. Earth scan.
- Martinho, M. G., Gonçalves, M. G., e Silveira, A. (2011). Gestão Integrada de Resíduos. Lisboa: Universidade Aberta
- Matthiessen, M. K., Larney, F. J., Selinger, L. B., & Olson, A. F. (2005). Influence of loss-on-ignition temperature and heating time on ash content of compost and manure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(17–18), 2561–2573. <https://doi.org/10.1080/00103620500257242>
- NASA (2020, 28 de agosto). Global Modeling and Assimilation Office. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/>
- Novo Verde (2014). PERSU 2020: Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos. https://www.novoverde.pt/PDF-docs/PERSU2020_Fev14_v2.pdf
- Oliveira, R. (2010) Testes de Maturação Aplicados a Matrizes Bioestabilizadas. [Dissertação para obtenção de grau de mestre em engenharia do ambiente, Instituto Superior de Agronomia]. <http://hdl.handle.net>

- Penacho, I. (2016) Estudo da Compostagem na ERSUC – otimização de variáveis no CITVRSU de Coimbra. [Dissertação para obtenção de Grau de mestre em Gestão Ambiental, Escola Superior Agrária de Coimbra]. RCAAP. <http://hdl.handle.net/10400.26/12920>
- Piedade, M. & Aguiar, P. (2010). Opções de Gestão de Resíduos Urbanos Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR, I. P.), Lisboa, 211 pp.
- Pinto, I. (2013). Estudo de acidificação de um composto de resíduos verdes alcalino. [Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia do Ambiente, Universidade Nova de Lisboa-Faculdade de Ciências e Tecnologia]. Repositório Universidade Nova. <http://hdl.handle.net/10362/11221>
- Poincelot R.P. (1972) Biochemistry and methodology of composting. Connecticut Experiment Station Bull, 727: 1– 38. <https://archive.org/details/biochemistrymeth00poin>
- PORDATA (2020). Incêndios florestais e área ardida. <https://www.pordata.pt/Europa/Inc%C3%AAndios+florestais+e+%C3%A1rea+ardida->
- Ricardo, O.-O. E., Fernando, M.-R. L., & Patrícia, T.-L. (2014). Evaluation of the Addition of Wood Ash to Control the pH of Substrates in Municipal Biowaste Composting. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(3), 469–478. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)70355-5](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)70355-5)
- Sá, S., Nunes, M. I., Matos, A., & Tarelho, L. (2013). Gestão de cinzas de fundo de biomassa e avaliação do potencial fertilizante. *10ª Conferência Nacional Do Ambiente.*, 398–403.
- Santiago, A. (2020, maio). Agricultura aceita composto se forem removidos “obstáculos”. *Água & Ambiente*, p. 24
- Sequeira, L. (2013). Compostagem de resíduos sólidos urbanos e avaliação da qualidade dos produtos obtidos- Caso de estudo da Amarsul S.A. [Dissertação para obtenção de grau de mestre em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia]. Repositório da Universidade de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10400.5/6130>
- Silveira, A (1987). Contribuição para o estudo da influência da relação carbono/azoto no processo de compostagem de resíduos sólidos. [Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Sanitária, Faculdade de Ciência e Tecnologias]. Repositório Universidade Nova. <https://run.unl.pt/handle/10362/4764>
- Steenari, Karlsson & Lindqvist (1999) Chemical and leaching characteristics of ash combustion of coal, peat and wood in a 12 MW CFB- a comparative study. *Fuel*, 78(2), 249-258, [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00137-9](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00137-9)
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase-mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40–76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041>
- Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., & Vassilev, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview. *Fuel*, 158, 330–350. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.050>

Villar, M. C., Beloso, M. C., Acea, M. J., Cabaneiro, A., Gonzalez-Prieto, S. J., Diaz-Ravina, M., and Carballas, T. (1993). Physical and chemical characterization of four composted urban refuses. *Bioresource Technology*. 45:105–13, [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(93\)90098-V](https://doi.org/10.1016/0960-8524(93)90098-V)

Documentos legislativos

Decreto-lei nº 73/2011 do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. (2011). Diário da República: Série I, nº 116/2011. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/73/2011/06/17/p/dre/pt/html>

Decreto-lei nº 103/2015 do Ministério da Economia. (2015). Diário da República: Série I, nº 114/2015. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/103/2015/06/15/p/dre/pt/html>

Decreto-lei nº 120/2019 do Ministério Do Ambiente e Da Transição Energética (2019). Diário da República: Série I, nº 160/2019. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/120/2019/08/22/p/dre>

Decreto-lei nº 152-C/2017 do Ministério da Economia (2017). Diário da República: Série I, nº 236/2017. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/152-c/2017/12/11/p/dre/pt/html>

Decreto-lei nº 178/2006 do Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional (2006). Diário da República: Série I, nº 171. <https://data.dre.pt/eli/dec-lei/178/2006/p/cons/20171211/pt/html>

Despacho nº 3350/2015 do Ministério do Ambiente, ordenamento do Território e Energia (2015). Diário da República: Série II, nº 64/2015. <https://dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/66896121/details/maximized?jp=true>

Despacho nº 21295/2009 dos Ministérios do Ambiente e do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional e da Economia e da Inovação (2009). Diário da República: Série II, nº 184/2009. https://apambiente.pt/_zdata/Políticas/Resíduos/Planeamento/PERSU_II/Despacho21295_2009_CDR.pdf

Decisão 2014/955/EU que altera a Decisão 2000/532/CE relativa à lista de resíduos em conformidade com a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Jornal da Comissão Europeia L370/44. <http://data.europa.eu/eli/dec/2014/955/oj>

Diretiva (EU) 2018/852 que altera a Diretiva 94/62/CE relativa a embalagens e resíduos de embalagens (2018). Jornal Oficial da União Europeia L 150/141. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/852/oj>

Diretiva 2011/97/UE que altera a diretiva 1999/31/CE. (2011). Jornal Oficial da União Europeia L 328/49. <http://data.europa.eu/eli/dir/2011/97/oj>

Portaria nº 241-B/2019 do Ambiente e Transição Energética (2019). Diário da República: I série, nº 145. <https://data.dre.pt/eli/port/241-B/2019/07/31/p/dr>

Regulamento (CE) do Parlamento Europeu e do Conselho nº 2003/2003 (2003). Jornal Oficial nº L304. <http://data.europa.eu/eli/reg/2003/2003/oj>

Resolução de Conselho de Ministros nº 29/2010. (2010). Diário da República: Série I, nº 73/2010. <https://data.dre.pt/eli/resolconsmin/29/2010/04/15/p/dre/pt/html>

Resolução do Conselho de Ministros nº 114/2006. (2006). Diário da República: Série I, nº 179/2006. <https://data.dre.pt/eli/resolconsmin/114/2006/09/15/p/dre/pt/html>

ANEXOS

I. CÁLCULO DA CAPITAÇÃO DE RU

Tabela I.1.- Produção de RU, habitantes e capitação de RU por SGRU.

SGRU	Produção RU toneladas	Habitantes	Capitação RU kg/hab.ano
Algar	406 186	439 241	925
Ambilital	67 549	109 739	616
Gesamb	83 293	142 626	584
Amarsul	445 451	783 288	569
Lipor	530 930	959 569	553
Amcal	13 051	23 684	551
Valorminho	39 505	72 823	542
Resialentejo	47 295	88 382	535
Tratolixo	454 106	858 700	529
Valorsul	835 673	1 598 954	523
Ecolezíria	60 672	122 886	494
Valnor	118 031	246 541	479
Resitejo	93 178	198 005	471
Resíduos Nordeste	60 796	131 571	462
Suldouro	201 358	438 448	459
Ersuc	418 704	919 163	456
Resulima	140 859	309 530	455
Braval	125 552	286 549	438
Valorlis	129 741	299 007	434
Ambisousa	142 571	331 889	430
Resinorte	383 512	913 749	420
Resiestrela	75 767	184 457	411
Planalto Beirão	133 018	328 417	405

II. CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DE FUNDO

				Report number : AR-19-AN-018045-02		
				Page 4 of 5		
				Description	Cinzas Fundo	
				Sample number	119056230	
Parameter	Lab	Accr.	Method	LOQ	Unit	
Elements from the shaken 10:1 eluate acc. to DIN EN 12457-4: 2003-01						
Antimony (Sb)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	< 0.001
Antimony (Sb)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	< 0.01
Arsenic (As)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	0.002
Arsenic (As)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	0.02
Barium (Ba)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	0.059
Barium (Ba)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	0.59
Lead (Pb)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	< 0.001
Lead (Pb)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	< 0.01
Cadmium (Cd)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.0003	mg/l	< 0.0003
Chromium (Cr)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	0.023
Chromium (Cr)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	0.23
Copper (Cu)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.005	mg/l	< 0.005
Copper (Cu)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.05	mg/kg dw	< 0.05
Molybdenum (Mo)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	0.010
Molybdenum (Mo)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	0.10
Nickel (Ni)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	< 0.001
Nickel (Ni)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	< 0.01
Mercury (Hg)	FR	JE02	DIN EN ISO 12846: 2012-08	0.0002	mg/l	< 0.0002
Mercury (Hg)	FR	JE02	DIN EN ISO 12846: 2012-08	0.002	mg/kg dw	< 0.002
Selenium (Se)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.001	mg/l	< 0.001
Selenium (Se)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/kg dw	< 0.01
Zinc (Zn)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.01	mg/l	0.01
Zinc (Zn)	FR	JE02	DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.1	mg/kg dw	0.1
Org. sum parameters from the shaken 10:1 eluate acc. to DIN EN 12457-4: 2003-01						
DOC (Dissolved Organic Carbon)	FR	JE02	DIN EN 1484: 1997-08	1.0	mg/l	56
DOC (Dissolved Organic Carbon)	FR	JE02	DIN EN 1484: 1997-08	10	mg/kg dw	560
Phenol index, steam volatile	FR	JE02	DIN EN ISO 14402 (H37): 1999-12	0.010	mg/l	< 0.010
Phenol index, steam volatile	FR	JE02	DIN EN ISO 14402 (H37): 1999-12	0.10	mg/kg dw	< 0.10

Figura II.1.- Relatório das cinzas de fundo de biomassa.

III. CARACTERIZAÇÃO DO COMPOSTO “AMARTERRA”

 					
order number: sample number: customer sample barcode/ sample designation:		72003907 720020670 Amarterra 06_20			
parameter	unit	QL	MU [%]	standard	result value
Physical parameter					
bulk density	g/l OS	10		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II A 4, 2006	618
dry bulk density	g/l DM	10		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II A 4, 2006 (calculated*)	430
moisture content	Ma.-% OS	0.01		DIN EN 13040:2007-02 (calculated*)	30.6
dry substance (105°C)	Ma.-% OS	0.1	1.03	DIN EN 13040:2007-02	69.4
salt content	g/l OS	0.01		DIN EN 13038:2012-01 (calculated*)	12.26
electrical conductivity	µS/cm OS			DIN EN 13038:2012-01	3758
pH value (25 °C) (H ₂ O)			5.22	DIN EN 13037:2012-01	8.6
rotting process level				Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel IV, Abschnitt A, 2006	pending
temperature, maximum	°C			Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel IV, Abschnitt A, 2006	pending
contaminants (plastic, non deformable)	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006 (calculated*)	0.02
glass	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	0.02
hard synthetics	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	< 0.01
metal	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	< 0.01
soft synthetics	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	< 0.01
hard and soft plastics	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006 (calculated*)	-
report: 7200390701 Jena, 16.07.2020 2/4					

Figura III.1.- Relatório do composto fornecido pela Amarsul: massa volúmica, humidade, condutividade elétrica e antropogénicos.

parameter	unit	QL	MU [%]	standard	result value
Physical parameter					
other	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	0.10
stones >10mm diameter	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	< 0.01
stones >5mm diameter	Ma.-% DM	0.01		Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel II, Abschnitt C1, 2006	< 0.01
Plant nutrients, total contents					
total nitrogen	Ma.-% DM	0.03	7.95	DIN EN 13654:2002-01	1.88
total nitrogen	mg/kg DM	300	7.95	DIN EN 13654:2002-01 (calculated*)	18800
phosphorus calculated as P ₂ O ₅	mg/kg DM	100		DIN EN ISO 11885:2009-09 (calculated*)	14000
potassium calculated as K ₂ O	mg/kg DM	100	14.88	DIN EN ISO 11885:2009-09 (calculated*)	14000
magnesium calculated as MgO	mg/kg DM	100	12.92	DIN EN ISO 11885:2009-09 (calculated*)	14000
calcium calculated as CaO	mg/kg DM	100	13.9	DIN EN ISO 11885:2009-09 (calculated*)	72300
Plant nutrients, soluble contents					
ammonium nitrogen	mg/l OS	1	23.01	Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel III A 2.1, 2006 (calculated*)	607
ammonium nitrogen	mg/kg DM	10	23.01	Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel III, Abschnitt A 2.1, 2006 (calculated*)	1420
nitrate nitrogen	mg/l OS	1.00	9.85	Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel III A 2.1, 2006 (calculated*)	< 1.00
nitrate nitrogen	mg/kg DM	10.0	9.85	Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel III, Abschnitt A 2.1, 2006 (calculated*)	< 10.0
Determination from the aqua regia digestion acc. to EN 13650					
lead	mg/kg DM	0.3	12.83	DIN EN ISO 11885:2009-09	85
boron	mg/kg DM	1		DIN EN ISO 11885:2009-09	33
cadmium	mg/kg DM	0.1	11.27	DIN EN ISO 11885:2009-09	2.1
chromium total	mg/kg DM	0.3	12.88	DIN EN ISO 11885:2009-09	30
cobalt	mg/kg DM	1		DIN EN ISO 11885:2009-09	4.6
copper	mg/kg DM	2	14.76	DIN EN ISO 11885:2009-09	170
sodium	mg/kg DM	10		DIN EN ISO 11885:2009-09	6400
molybdenum	mg/kg DM	2.0		DIN EN ISO 17294-2:2017-01	< 2.0
nickel	mg/kg DM	1.5	12.73	DIN EN ISO 11885:2009-09	25

report: 7200390701

Jena, 16.07.2020

3/4

Figura III.2.- Relatório do composto fornecido pela Amarsul: metais pesados, nutrientes e antropogénicos.

parameter	unit	QL	MU [%]	standard	result value
-----------	------	----	--------	----------	--------------

Determination from the aqua regia digestion acc. to EN 13650

mercury	mg/kg DM	0.01	17.78	DIN EN 13650:2002-01	0.35
selenium	mg/kg DM	0.003		DIN EN 13650:2002-01	0.31
zinc	mg/kg DM	2	14.54	DIN EN ISO 11885:2009-09	320
sulfur	mg/kg DM	10	13.71	DIN EN ISO 11885:2009-09	4000

soil improvement

loss on ignition of the dry substance (450 °C)	Ma.-% DM	0.01	1.03	DIN EN 13039:2012-01	33.5
--	----------	------	------	----------------------	-------------

Hygiene parameters

germinable seed and vegetable parts	je I OS			Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate, Kapitel III, Abschnitt B 2.1, 2006	0
vegetable compatibility				DIN EN 16086-1:2012-01	siehe Anlage (1 Seite)

particle size distribution

grain size distribution > 25 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	< 0.1
grain size distribution 20-25 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	< 0.1
grain size distribution 10 - 20 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	< 0.1
grain size distribution 5 - 10 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	0.4
grain size distribution 2 - 5 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	1.6
grain size distribution 1 - 2 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	14.5
grain size distribution < 1 mm	Ma.-%	0.1		DIN ISO 11277:2002-08	83.5

Additional notes:

calculated* - calculation based on the result of the stated standard

Customer specific information:

Basic sample-related data, which always originate from the client, are: sampling date, sampler, sample name, grain size. Data from the client for the matrix soil are: type of use, stone content, area size, area description (if not specified, the assumption is AL, stone content 0%). The information on clay content, fine fraction, humus fraction, soil group and soil type can come from the client as basic data or can be collected by analysis by the laboratory. Eurofins Agraranalytik Deutschland GmbH assumes no liability for data originating from the client and the invoices or evaluations created with reference to this information.

report: 7200390701

Jena, 16.07.2020

4/4

Figura III.3.- Relatório do composto fornecido pela Amarsul: metais pesados, antropogénicos e à distribuição granulométrica

IV. CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA 25°C

Tabela IV.1. - Fator corretivo de temperatura a aplicar à condutividade elétrica.

Tabela II - Factor de correcção de temperatura, f, para a conversão de valores de condutividade de águas naturais de T°C para 25°C.

Temperatura Graus	f									
	Décimos de grau									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	1,981	1,912	1,906	1,899	1,893	1,887	1,881	1,875	1,869	1,863
1	1,857	1,851	1,845	1,840	1,834	1,829	1,822	1,817	1,811	1,805
2	1,800	1,794	1,788	1,783	1,777	1,772	1,766	1,761	1,756	1,750
3	1,745	1,740	1,734	1,729	1,724	1,719	1,713	1,708	1,703	1,698
4	1,693	1,688	1,683	1,678	1,673	1,668	1,663	1,658	1,653	1,648
5	1,643	1,638	1,634	1,629	1,624	1,619	1,615	1,610	1,605	1,601
6	1,596	1,591	1,587	1,582	1,578	1,573	1,569	1,564	1,560	1,555
7	1,551	1,547	1,542	1,538	1,534	1,529	1,525	1,521	1,516	1,512
8	1,508	1,504	1,500	1,496	1,491	1,487	1,483	1,479	1,475	1,471
9	1,467	1,463	1,459	1,455	1,451	1,447	1,443	1,439	1,436	1,432
10	1,428	1,424	1,420	1,416	1,413	1,409	1,405	1,401	1,398	1,394
11	1,390	1,387	1,383	1,379	1,376	1,372	1,369	1,365	1,362	1,358
12	1,354	1,351	1,347	1,344	1,341	1,337	1,334	1,330	1,327	1,323
13	1,320	1,317	1,313	1,310	1,307	1,303	1,300	1,297	1,294	1,290
14	1,287	1,284	1,281	1,278	1,274	1,271	1,268	1,265	1,262	1,259
15	1,256	1,253	1,249	1,246	1,243	1,240	1,237	1,234	1,231	1,228
16	1,225	1,222	1,219	1,216	1,214	1,211	1,208	1,206	1,202	1,199
17	1,196	1,193	1,191	1,188	1,185	1,182	1,179	1,177	1,174	1,171
18	1,168	1,166	1,163	1,160	1,157	1,155	1,152	1,149	1,147	1,144
19	1,141	1,139	1,136	1,134	1,131	1,128	1,126	1,123	1,121	1,118
20	1,116	1,113	1,111	1,108	1,105	1,103	1,101	1,098	1,096	1,093
21	1,091	1,088	1,086	1,083	1,081	1,079	1,076	1,074	1,071	1,069
22	1,067	1,064	1,062	1,060	1,057	1,055	1,053	1,051	1,048	1,046
23	1,044	1,041	1,039	1,037	1,035	1,032	1,030	1,028	1,026	1,024
24	1,021	1,019	1,017	1,015	1,013	1,011	1,008	1,006	1,004	1,002
25	1,000	0,998	0,996	0,994	0,992	0,990	0,987	0,985	0,983	0,981
26	0,979	0,977	0,975	0,973	0,971	0,969	0,967	0,965	0,963	0,961
27	0,959	0,957	0,955	0,953	0,952	0,950	0,948	0,946	0,944	0,942
28	0,940	0,938	0,936	0,934	0,933	0,931	0,929	0,927	0,925	0,923
29	0,921	0,920	0,918	0,916	0,914	0,912	0,911	0,909	0,907	0,905
30	0,903	0,902	0,900	0,898	0,896	0,895	0,893	0,891	0,889	0,888
31	0,886	0,884	0,883	0,881	0,879	0,877	0,876	0,874	0,872	0,871
32	0,869	0,867	0,866	0,864	0,863	0,861	0,859	0,858	0,856	0,854
33	0,853	0,851	0,850	0,848	0,846	0,845	0,843	0,842	0,840	0,839
34	0,837	0,835	0,834	0,832	0,831	0,829	0,828	0,826	0,825	0,823
35	0,822	0,82	0,819	0,817	0,816	0,814	0,813	0,811	0,81	0,808

Disciplina: Técnicas Laboratoriais em Ambiente
 Docente: Profª Doutora Maria da Conceição Carrilho Raimundo dos Santos
 Curso: Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente
 Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente, F.C.T./U.N.L.

V. TRATAMENTO DOS RESULTADOS

Tabela V.1.- Dados calculado da matéria orgânica (média e desvio padrão).

Amostra	Referência	Tara (g)	Tara + As 105 °C (g)	Tara + As 505 °C (g)	Matéria Orgânica a 505 °C (%)	Média (g)	MO a 505°C (%)	Desvio Padrão (%)
Cinzas	C	56,5121	58,506	57,784	36,195	57,294	37,948	1,168
	L	56,1095	58,105	57,327	38,997			
	E	55,5445	57,542	56,770	38,651			
Composto	J	55,7398	57,734	56,968	38,422	49,980	38,996	0,994
	B5	59,8923	61,896	61,133	38,079			
	LV	30,6267	32,663	31,839	40,486			
Mistura 1 (Composto 90%+Cinzas 10%)	A33	29,3529	31,368	30,645	35,904	32,048	34,364	1,027
	84	34,5856	36,590	35,906	34,120			
	11	28,253	30,254	29,592	33,068			
Mistura 2 (Composto 80% + Cinzas 20%)	VII	46,0789	48,083	47,432	32,492	51,910	32,800	0,406
	14	52,6663	54,662	54,014	32,500			
	18	52,9573	54,951	54,285	33,409			
Mistura 3 (Composto 70%+ Cinzas 30%)	4	22,9478	24,951	24,375	28,737	35,566	30,301	1,418
	IX	40,4483	42,455	41,858	29,738			
	8	39,1145	41,111	40,463	32,428			

Tabela V.2.- Dados calculados da humidade (média e desvio padrão).

Tipo de Amostra	Laboratório							AMARSUL
	Referência	Tara (g)	Tara + Ah (g)	Tara + As (g)	Humidade (%)	Média da Humidade (%)	Erro associado	Humidade (%)
Cinzas	R3	14,71	269,28	135,88	52,4	52,20	0,20	
	13	13,14	327,4	163,97	52,0			
Composto	G93	13,4	238,88	163,78	33,3	32	1,12	31
	G8	13,35	240,16	169,68	31,1			
Mistura 1 (Composto 90% + Cinzas 10%)	9	14,63	311,34	229,04		27,7		
Mistura 2 (Composto 80% + Cinzas 20%)	G93	13,48	357,11	232,78		36,2		
Mistura 3 (Composto 70% + Cinzas 30%)	3	14,69	331,87	206,85		39,4		

Tabela V.3.- Distribuição granulométrica do composto.

Dimensão (mm)	Peso+ Tara(g)	Tara (g)	Peso (g)	% Antes da crivagem	% Face ao perdido
> 25	0	0	0	0,00%	0,00%
25 a 12,5	6,8	6,7	0,1	0,01%	0,01%
12,5 a 6,3	57,3	14,7	42,6	4,26%	4,35%
6,3 a 2	271,5	0	271,5	27,15%	27,70%
< 2	666	0	666	66,59%	67,95%
Total antes da crivagem (g)	1000,1	Perdas	19,9	1,99%	
		Total após a crivagem	980,2	100,00%	
		TOTAL ANTES DA CRIVAGEM	1000,1		

Tabela V.4.- Distribuição granulométrica das cinzas de fundo.

<i>Dimensão (mm)</i>	<i>Peso+ Tara(g)</i>	<i>Tara (g)</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>% Antes da crivagem</i>	<i>% Face ao perdido</i>
> 25	0	0,00	0	0,00%	0,00%
25-12,5	64,2	49,50	14,7	1,47%	1,50%
12,5-6,3	114,3	14,70	99,6	9,95%	10,16%
6,3-2	731	0,00	731	73,06%	74,58%
2	15	0,00	15	1,50%	1,53%
Total antes da crivagem (g)	1000,6	Perdas	105,5	10,54%	
		Total após a crivagem	895,1	96,52%	
		TOTAL ANTES DA CRIVAGEM	1000,6		

Tabela V.5.- Distribuição granulométrica da mistura 1.

<i>Dimensão (mm)</i>	<i>Peso+ Tara(g)</i>	<i>Tara (g)</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>% Antes da crivagem</i>	<i>% Face ao perdido</i>
> 25	0	0	0	0,00%	0,00%
25-12,5	15,35	12,57	2,78	0,28%	0,28%
12,5-6,3	40,38	12,57	27,81	2,78%	2,84%
6,3-2	317,56	12,56	305	30,50%	31,12%
2	679,87	36,15	643,72	64,37%	65,67%
Total antes da crivagem (g)	1000,1	Perdas	20,78	2,08%	
		Total após a crivagem	979,32	100,00%	
		TOTAL ANTES DA CRIVAGEM	1000,1		

Tabela V.6.- Distribuição granulométrica da mistura 2.

<i>Dimensão (mm)</i>	<i>Peso + Tara (g)</i>	<i>Tara (g)</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>% Antes da crivagem</i>	<i>% Face ao perdido</i>
> 25	0	0	0	0,00%	0,00%
25-12,5	17,47	12,56	4,91	0,49%	0,50%
12,5-6,3	50,46	12,5	37,96	3,80%	3,87%
6,3-2	348,93	12,57	336,36	33,63%	34,32%
2	647,06	35,99	611,07	61,09%	62,34%
<i>Total antes da crivagem (g)</i>	1000,2	<i>Perdas</i>	9,9	0,99%	
		<i>Total após a crivagem</i>	990,3	100,00%	
		<i>TOTAL ANTES DA CRIVAGEM</i>	1000,2		

Tabela V.7.- Distribuição granulométrica da mistura 3.

<i>Dimensão (mm)</i>	<i>Peso+ Tara (g)</i>	<i>Tara (g)</i>	<i>Peso (g)</i>	<i>% Antes da crivagem</i>	<i>% Face ao perdido</i>
> 25	0	0	0	0,00%	0,00%
25-12,5	14,22	12,57	1,65	0,16%	0,17%
12,5-6,3	73,52	12,57	60,95	6,09%	6,22%
6,3-2	589,14	36,15	552,99	55,28%	56,42%
2	411,4	36,15	375,25	37,51%	38,28%
<i>Total antes da crivagem (g)</i>	1000,4	<i>Perdas</i>	9,59	0,96%	
		<i>Total após a crivagem</i>	990,81	100,00%	
		<i>TOTAL ANTES DA CRIVAGEM</i>	1000,4		

Tabela V.8.- Condutividade elétrica corrigida para 25°C e os respectivos fatores de correção

Amostra	Laboratório				AMARSUL
	Condutividade (mS/cm)	Temperatura (°C)	Fator corretivo	Condutividade a 25°C (mS/cm)	Condutividade (mS/cm)
Cinzas	0,821	20,500	1,103	0,906	
Composto	3,780	19,500	1,128	4,264	3,758
Mistura 1 (Composto 90% + Cinzas 10%)	3,000	18,400	1,157	3,471	
Mistura 2 (Composto 80% + Cinzas 20%)	2,815	19,900	1,188	3,344	
Mistura 3 (Composto 70%+ Cinzas 30%)	2,406	18,500	1,155	2,779	

Tabela IV.9. - Dados da massa volúmica aparente.

Amostra	Tara (g)	Peso+ Tara (g)	Volume (l)	Massa volúmica (kg/m³)
Composto	169,11	834,75	1	666
Mistura 1 (Composto 90% + Cinzas 10%)	169,04	787,96	1	619
Mistura 2 (Composto 80% + Cinzas 20%)	169,07	783,23	1	614
Mistura 3 (Composto 70%+ Cinzas 30%)	169,09	750,96	1	582

VI. BOLETIM DO COMPOSTO RICATERRA®

Tabela VI.1- Conteúdo de metais pesados no composto Ricaterra®.

CONTEÚDO EM METAIS PESADOS "Conteúdo em metais pesados inferior ou igual aos valores máximos admissíveis para esta classificação."	mg.kg ⁻¹ m.s.
• Cádmio total (Cd)	1,9 mg.kg ⁻¹
• Chumbo total (Pb)	22 mg.kg ⁻¹
• Cobre total (Cu)	102 mg.kg ⁻¹
• Crômio total (Cr)	39 mg.kg ⁻¹
• Mercúrio total (Hg)	0,27 mg.kg ⁻¹
• Níquel total (Ni)	16 mg.kg ⁻¹
• Zinco total (Zn)	350 mg.kg ⁻¹