

**Nova abordagem para a otimização da gestão de resíduos
de construção e demolição (com componente temporal)**

Aplicação à Área Metropolitana de Lisboa

Fernando Galimberti Braga

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão Industrial

Orientadores: Professora Doutora Cristina Marta Castilho Pereira Santos Gomes

Doutor Joaquim Manuel Roberto Antunes Duque

Júri

Presidente: Professora Tânia Rodrigues Pereira Ramos

Orientadora: Professora Cristina Marta Castilho Pereira Santos Gomes

Arguente: Professor Henrique Aníbal Santos de Matos

Setembro de 2021

Declaration

I declare that this document is an original work of my own authorship and that it fulfils all the requirements of the Code of Conduct and Good Practices of the Universidade de Lisboa.

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

À professora Doutora Marta Gomes, por todo apoio nestes últimos meses, pela disponibilidade e importante auxílio desde o início do trabalho.

Ao Doutor Joaquim Duque, por toda ajuda que deu no trabalho, principalmente no que toca ao modelo, além de se mostrar sempre disponível de forma muito rápida.

À minha família, que mesmo longe sempre se fez muito presente. Aos meus pais, que sempre me apoiaram nas minhas decisões, e ao meu irmão, que é e sempre será meu melhor amigo.

Aos meus amigos, que acabaram por ser tornar a minha família em Portugal, e se não fosse por eles esta dissertação provavelmente não estaria sendo feita. Um agradecimento especial ao meu amigo Serguinho, por ter me disponibilizado o seu computador para que conseguisse correr o meu modelo.

Resumo

Os impactos causados pelos resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser elevados caso não se efetue uma gestão eficaz dos mesmos. Em consequência, as preocupações relacionadas com esta gestão têm aumentado nos últimos anos, estimulando a elaboração de estudos sobre o assunto.

Esta dissertação tenciona dar continuidade aos trabalhos de Correia (2013) e Andrade (2015), que desenvolveram uma nova abordagem para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD, utilizando um modelo de programação linear inteira mista que visa a minimização de custos. Neste trabalho é adicionada uma componente temporal à formulação matemática, o que possibilita modelar os fluxos de materiais entre os diversos processos para cada um dos períodos do horizonte temporal considerado.

O modelo é validado utilizando um conjunto de dados reduzido, sendo consideradas apenas 10 freguesias e, em seguida, é aplicado às 211 freguesias que compõe a Área Metropolitana de Lisboa (AML), com a geração de múltiplos cenários e uma análise de sensibilidade aos parâmetros mais relevantes. Embora tenha sido aplicado a nível regional, a formulação é genérica a ponto de poder ser utilizada a nível nacional.

Os resultados obtidos indicam que, do ponto de vista económico, é mais viável depositar os RCD em aterro do que reciclar. Além disso, é possível concluir que o custo de deposição em aterro dos resíduos possui elevada influência na quantidade de RCD reciclados.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição, programação linear inteira mista, modelo de otimização, Área Metropolitana de Lisboa.

Abstract

The impacts caused by construction and demolition waste (CDW) can be high if it is not managed effectively. Consequently, the concerns related to this management have increased in recent years, stimulating the development of studies on the subject.

This dissertation intends to continue the work of Correia (2013) and Andrade (2015), who developed a new approach for the planning of a CDW recycling network, using a mixed integer linear programming model that aims to minimize costs. In this work a temporal component is added to the mathematical formulation, which makes it possible to model the material flows between the various processes for each of the periods of the time horizon considered.

The model is validated using a reduced data set, considering only 10 parishes, and is then applied to the 211 parishes that make up the Metropolitan Area of Lisbon (MAL), with the generation of multiple scenarios and a sensitivity analysis of the most relevant parameters. Although it was applied at regional level, the formulation is generic to the extent that it can be used at national level.

The results obtained indicate that, from an economic point of view, it is more viable to landfill CDW than to recycle. Furthermore, it can be concluded that the cost of landfilling waste has a high influence on the amount of CDW recycled.

Keywords: Construction and demolition waste, mixed integer linear programming, optimization model, Metropolitan Area of Lisbon.

Índice

Declaration	ii
Declaração	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo	iv
Abstract.....	v
Índice	vi
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Contextualização do Problema	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da Dissertação.....	3
2. Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (GRCD)	4
2.1 Resíduos	4
2.1.1 Produção de Resíduos.....	4
2.1.2 Tratamento dos resíduos.....	5
2.2 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	6
2.2.1 Classificação dos RCD.....	6
2.2.1.1 Lista Europeia de Resíduos (LER).....	7
2.2.1.2 Tipo de obra	8
2.2.1.3 Destino dos resíduos.....	8
2.2.1.4 Tipo de material.....	9
2.2.2 Composição dos RCD	9
2.2.3 Quantificação dos RCD	10
2.2.3.1 Qualidade dos Dados	10
2.2.3.2 Produção de RCD	11
2.3 Quadro legal	12
2.3.1 União Europeia (UE)	12

2.3.2 Portugal	13
2.4 Definição e Estratégias da GRCD	13
2.4.1 Princípio dos 3 R's	14
2.4.2 Abordagem do Ciclo de Vida.....	15
2.4.3 Princípio do Poluidor-Pagador	15
3. Revisão da Literatura	17
3.1 Visão Geral dos Estudos de RCD	17
3.2 Reciclagem dos RCD	17
3.2.1 Estatísticas da Reciclagem dos RCD.....	17
3.2.2 Impactes Ambientais Positivos e Negativos da Reciclagem de RCD.....	18
3.2.3 Barreiras à Reciclagem dos RCD	19
3.3 Centrais de Reciclagem	19
3.3.1 Classificação das Centrais de Reciclagem de RCD	19
3.3.1.1 Tipo de Central	19
3.3.1.2 Nível da Central.....	20
3.3.2 Funcionamento das Centrais de RCD.....	22
3.3.2.1 Equipamentos.....	22
3.3.2.2 Processos.....	23
3.4 Modelos de Otimização	26
3.4.1 Otimização de Custos	27
3.4.2 Aspectos Ambientais	28
3.4.3 Rede de Logística Inversa.....	29
4. Modelo para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD com a componente temporal	31
4.1 Modelos desenvolvidos por Correia (2013) e Andrade (2015)	31
4.1.1 Modelo de Correia (2013).....	31
4.1.2 Modelo de Andrade (2015).....	32
4.2 Abordagem deste trabalho – Componente temporal	34
4.2.1 Materiais e Layout dos processos	35
4.2.2 Matriz de transformação.....	37
4.2.3 Matriz de custos de processamento.....	40
4.3 Formulação Matemática do Modelo	41

4.3.1 Conjuntos e Índices	41
4.3.2 Parâmetros	41
4.3.3 Variáveis	42
4.3.4 Função objetivo	43
4.3.5 Restrições	44
4.3.6 Pressupostos do Modelo	48
5. Aplicação do Modelo: resultados e discussão	49
5.1 Dados de <i>Input</i>	49
5.2 Interface e Solver utilizado	55
5.3 Modelo Reduzido.....	55
5.3.1 Dados de <i>Input</i> do Modelo Reduzido	55
5.3.2 Resultados.....	56
5.3.2.1 Cenário Base	57
5.3.2.2 Cenário Comparativo.....	59
5.3.2.3 Cenário Livre	61
5.3.3 Síntese conclusiva do modelo de dimensão reduzida	63
5.4 Modelo aplicado às 211 freguesias da AML	63
5.4.1 Análise de cenários	63
5.4.1.1 Cenário A.....	63
5.4.1.2 Cenário B.....	66
5.4.1.3 Cenário C	67
5.4.2 Análise de Sensibilidade	68
5.4.2.1 Cenário D	68
5.4.2.2 Cenário E.....	70
5.4.2.3 Restantes cenários.....	72
5.4.3 Síntese conclusiva do modelo aplicado às 211 freguesias da AML	76
6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	77
Bibliografia	79
Anexos.....	82
Anexo I – Produção de resíduos nos países da UE (Eurostat, 2020a)	82
Anexo II – Percentagem de tratamento dos resíduos da UE-28 em 2016 (Eurostat, 2020b)	83

Anexo III – Classificação dos RCD de acordo com a LER (Segundo Correia, 2013).....	84
Anexo IV – Cálculos da Matriz de Transformação	85
Anexo V – Empresas de GRCD na AML.....	86
Anexo VI – Cálculo dos Custos de Processamento dos RCD	87
Anexo VII – Conjunto de materiais de entrada e saída dos processos	89
Anexo VIII – Freguesias da AML.....	90
Anexo IX – Produção de RCD por freguesia.....	92
Anexo X – Matriz de transformação de Andrade (2015).....	95
Anexo XI – Resultados do modelo reduzido	96
Anexo XII – Resultados do modelo completo	98

Lista de Figuras

Figura 1 – Produção de resíduos por atividade económica na UE-28 em 2016 (adaptado de PORDATA,2020)	5
Figura 2 – Tratamento dos resíduos em 2016 (adaptado de Eurostat, 2020b)	6
Figura 3 - Classificação dos RCD	7
Figura 4 - Componentes da Gestão de Resíduos (adaptado de PNGR, 2011).....	14
Figura 5 – Hierarquia de gestão de resíduos (adaptado de PNGR, 2011).....	14
Figura 6 – Ciclo de Vida de Construções	15
Figura 7 – Tratamento dos RCD na UE-28 em 2012 (adaptado de Deloitte,2017)	18
Figura 8 – Técnicas de reciclagem em função do tipo de RCD (adaptado de Symonds Group Ltd et al. 1999; Correia, 2013).....	21
Figura 9 – Processos de uma central de nível 3 (Coelho & de Brito, 2013b; Andrade, 2015)	24
Figura 10 – Rede de GRCD do modelo desenvolvido por Galan et al. (2013) (adaptado de Galan et al., 2013))	28
Figura 11 – Rede de logística dos RCD (adaptado de Xu et al., 2019)	30
Figura 12 – Funcionamento do modelo de Correia (2013) (Andrade, 2015)	31
Figura 13 – Esquema dos Processos de cada central (Andrade, 2015)	33
Figura 14 – Layout dos processos do modelo (adaptado de Andrade (2015)).....	35
Figura 15 – Fluxograma da equação do balanço de massa	48
Figura 16 – Mapa da AML (Andrade, 2015).....	49
Figura 17 – Mapa da AML com centroides das freguesias e estradas consideradas (Andrade, 2015)	50
Figura 18 – Sazonalidade e produção de RCD para cada período t	53
Figura 19 – Fluxograma de materiais no cenário base do modelo reduzido	58
Figura 20 – Resultados mensais do cenário base do modelo reduzido	58
Figura 21 – Fluxograma de materiais no cenário comparativo do modelo reduzido	60
Figura 22 – Fluxogramas de materiais no cenário livre do modelo reduzido (Esquerda: $X_{rec} = 0$; Direita: $X_{rec} = 1$).....	62
Figura 23 – Resultados mensais do cenário A	64
Figura 24 – Fluxograma de materiais do cenário A	65
Figura 25 – Resultados mensais do cenário B	66
Figura 26 – Fluxograma de materiais do cenário B	67
Figura 27 – Fluxograma de materiais do cenário D	69
Figura 28 – Resultados mensais do cenário D	70
Figura 29 – Resultados mensais do cenário E	72
Figura 30 – Custos (M€) e taxa de reciclagem dos cenários P, B, Q, R, S, T e U	75

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Produção de resíduos em milhões de toneladas (adaptado de Eurostat, 2020a).....	4
Tabela 2 – Exemplo da LER (a simbologia * refere-se a resíduos classificados como perigosos).....	8
Tabela 3 - Composição dos RCD produzidos em Portugal em 2015 (adaptado de Carrola (2017)) ...	10
Tabela 4 – Fiabilidade dos dados da Eurostat (adaptado de Deloitte, 2017)	11
Tabela 5 – Produção de RCD, per capita e por PIB em 2014 (adaptado de Sáez & Osmani, 2019) ..	11
Tabela 6 – Proporção percentual e preço de deposição em aterros de resíduos (adaptado de Eurostat (2020b) e CEWEP (2017))	16
Tabela 7 – Vantagens e desvantagens das centrais de reciclagem fixa e móvel (adaptado de Silva et al., 2017).....	20
Tabela 8 – Funções e tipos de equipamentos para centrais de RCD (Andrade, 2015)	23
Tabela 9 – Vantagens e desvantagens da triagem e britagem no local de obra ou na central de reciclagem (adaptado de Symonds Group Ltd et al., 1999).....	25
Tabela 10 – Descrição dos modelos de otimização presentes na literatura.....	27
Tabela 11 – Percentagem de produção de RCD mensal (Dados fornecidos pela empresa Renascimento e percentagem utilizada no modelo)	34
Tabela 12 – Materiais considerados no modelo de Andrade (2015) (adaptado de Andrade, 2015)	36
Tabela 13 – Matriz de transformação.....	38
Tabela 14 – Distribuição percentual da composição média dos RCD (Coelho & de Brito, 2010)	39
Tabela 15 – Matriz de Custos de Processamento (€/ton).....	40
Tabela 16 – Processos pré-existentes na AML considerados	51
Tabela 17 – Custo de investimento de uma nova central	52
Tabela 18 – Custo de investimento de um novo processo consoante sua capacidade	52
Tabela 19 – Proporção dos RCD	53
Tabela 20 – Custo de deposição em aterro	53
Tabela 21 – Aterros licenciados na AML.....	54
Tabela 22 – Procura de materiais reciclados na região de Lisboa (Coelho, 2012)	54
Tabela 23 – Procura para cada tipo de material vendido do modelo	54
Tabela 24 – Valor de venda dos materiais reciclados	55
Tabela 25 – Freguesias do modelo reduzido e seus respectivos processos e produção de RCD (Adaptado de Andrade (2015)).....	56
Tabela 26 – Capacidades consideradas no modelo reduzido	56
Tabela 27 – Estatísticas do modelo reduzido no cenário base.....	57
Tabela 28 – Dados de <i>output</i> do cenário base	57
Tabela 29 – Capacidades consideradas no cenário comparativo do modelo reduzido	59
Tabela 30 – Matriz de Custo de Processamento de Andrade (2015).....	59
Tabela 31 – Estatísticas do modelo reduzido de Andrade (2015) e do cenário comparativo	60
Tabela 32 – Dados de <i>output</i> do cenário comparativo	60
Tabela 33 – Dados de <i>output</i> do cenário livre.....	61
Tabela 34 – Custos e receitas dos 14,8% de RCD reciclados quando $X_{rec} = 0$	62

Tabela 35 – Estatísticas do modelo para o Cenário A.....	63
Tabela 36 – Dados de <i>output</i> do cenário A.....	64
Tabela 37 – Dados de <i>output</i> do cenário B.....	66
Tabela 38 – Dados de <i>output</i> do cenário C.....	68
Tabela 39 – Dados de <i>output</i> do cenário D.....	69
Tabela 40 – Capacidades autorizadas e a 20%.....	70
Tabela 41 – Dados de <i>output</i> do cenário E.....	71
Tabela 42 – Principais dados de <i>output</i> dos cenários desenvolvidos	74
Tabela 43 – Preço de deposição em aterro dos cenários P, B, Q, R, S, T e U	75
Tabela 44 – Anexo I: Produção de resíduos nos países da UE (Eurostat, 2020a)	82
Tabela 45 – Anexo II: Percentagem de tratamento dos resíduos da UE-28 em 2016 (Eurostat, 2020b)	83
Tabela 46 – Anexo III: Classificação dos RCD de acordo com a LER (Segundo Correia, 2013)	84
Tabela 47 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a triagem (k1)	85
Tabela 48 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a triagem incorporada (k2)	85
Tabela 49 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a reciclagem LQ (k3).....	85
Tabela 50 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a reciclagem HQ (k4)	85
Tabela 51 – Anexo V: Centrais de triagem e reciclagem encontradas na AML	86
Tabela 52 – Anexo VI: Capacidades autorizadas das centrais de reciclagem	87
Tabela 53 – Anexo VI: Capacidades autorizadas das centrais de triagem	87
Tabela 54 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário do processo na central de triagem.....	88
Tabela 55 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário da triagem incorporada	88
Tabela 56 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário da reciclagem LQ	88
Tabela 57 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário da reciclagem HQ	89
Tabela 58 – Anexo VII: Correspondências de materiais de entrada e saída dos processos	89
Tabela 59 – Anexo VIII: Freguesias da AML e seus nós	90
Tabela 60 – Anexo IX: Produção de RCD por freguesia (Segundo Bernardo (2013))	92
Tabela 61 – Matriz de transformação de Andrade (2015)	95
Tabela 62 – Anexo XI: Fluxo de materiais (em toneladas) e capacidade utilizada do cenário base do modelo reduzido	96
Tabela 63 – Anexo XI: Fluxo de materiais (em toneladas) e capacidade utilizada do cenário comparativo do modelo reduzido	96
Tabela 64 – Anexo XI: Fluxo de materiais (em toneladas) e capacidade utilizada no cenário livre do modelo reduzido	97
Tabela 65 – Anexo XII: Fluxo de materiais (em kton) e capacidade utilizada no cenário A.....	98
Tabela 66 – Anexo XII: Fluxo de materiais (em kton) e capacidade utilizada no cenário B	98
Tabela 67 – Anexo XII: Fluxo de materiais (em kton) e capacidade utilizada no cenário D.....	99

Lista de Abreviaturas

AML – Área Metropolitana de Lisboa

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

DL – Decreto-Lei

EC – European Commission (Comissão Europeia)

EI99 – Eco Indicator 99

EPS – Engenharia de Processos e Sistemas

GAMS – General Algebraic Modeling System

GRCD – Gestão de Resíduos de Construção e Demolição

LER – Lista Europeia de Resíduos

MILP – Mixed Integer Linear Programming (Programação Linear Inteira Mista)

PIB – Produto Interno Bruto

PNGR – Plano Nacional de Gestão de Resíduos

PPC – Paridade de Poder de Compra

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

UE – União Europeia

1. Introdução

1.1 Contextualização do Problema

Uma enorme quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) é produzida todos os anos, sendo que grande parte tem potencial para ser reciclado (Wu et al., 2019). Apenas na União Europeia (UE) foram produzidas mais de 920 milhões de toneladas de RCD em 2016, correspondendo a 36% do total de resíduos produzidos na região (Eurostat, 2020a), o que demonstra que uma gestão adequada destes resíduos é necessária e de extrema importância, principalmente no aspecto ambiental.

Contudo, a gestão deste tipo de resíduos é complicada por diversos fatores, começando pela sua composição, visto que os RCD apresentam uma constituição heterogénea, com materiais de diversas dimensões e níveis de perigosidade. Além disso, as atividades de construção, remodelação e demolição apresentam um carácter geograficamente disperso e temporário, o que dificulta a fiscalização por parte das entidades competentes. Somado aos fatores citados, o consumo dos recursos naturais finitos, a deposição ilegal dos RCD e a falta de espaço para criação de aterros em algumas regiões levou a um aumento do número de estudos e legislações relativos à Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (GRCD), visando reduzir os impactos ambientais de forma economicamente viável.

A primeira atitude tomada pela UE foi a aprovação da Diretiva (2008/98/EC), que estipula como meta para 2020 que os Estados-Membros preparem para reutilização, reciclagem e valorização pelo menos 70%, em peso, dos RCD não perigosos. Assim sendo, foi aprovado em 2008 em Portugal o Decreto-Lei n.º 46/2008 (posteriormente alterado pelo DL n.º 73/2011), visando transpor esta diretiva e elaborar um regime de gestão específico para os RCD, auxiliando o país a alcançar a meta estabelecida pelo Parlamento Europeu.

De acordo com Sáez & Osmani (2019), Portugal tratou menos de 60% do total dos RCD gerados em 2012, enquanto Deloitte (2017) alega que este valor é na verdade maior que os 70% estabelecidos pela UE. Esta discrepância de valores está relacionada principalmente com o facto da maioria das empresas de construção serem de pequena ou média dimensão, fazendo com que grande parte da produção de resíduos seja desconhecida, indicando que a GRCD precisa ser aprimorada.

Com base neste cenário que é desenvolvido este trabalho, visto que modelos de otimização da rede de reciclagem de RCD podem ser instrumentos cruciais na busca das metas estipuladas pelas entidades governamentais, tencionando minimizar os custos dos processos causados pela produção e gestão dos resíduos.

1.2 Objetivos

Hiete et al. (2011) desenvolveu um modelo para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD que, posteriormente, foi aplicado à Área Metropolitana de Lisboa (AML) por Correia et al. (2015). Em seguida, Andrade et al. (2017) planeou em pormenor o funcionamento da rede e todos os processos implícitos. Assim sendo, o principal objetivo desta dissertação consiste em desenvolver um modelo de

otimização para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD, sendo aplicado AML e com o incremento da componente temporal. A solução do modelo possibilitará a tomada de decisão quanto a:

- Abertura de novas centrais de triagem e reciclagem (tipos de processos, capacidades e localização);
- Fluxo de materiais entre os diferentes processos da rede em cada período do horizonte temporal considerado.

1.3 Metodologia

Nesta secção é apresentada a metodologia seguida nesta dissertação, que pode ser retratada em 5 fases:

- **1ª fase – Contextualização do problema**
Nesta etapa são introduzidos diversos conceitos relativos aos Resíduos de Construção e Demolição e sua gestão, com o objetivo de contextualizar de um modo geral o problema estudado.
- **Etapa 2 – Revisão de literatura**
Na revisão de literatura analisam-se os estudos existentes na área dos RCD e da sua gestão, com foco particular nos modelos de otimização descritos na literatura, visto que o principal objetivo da dissertação é desenvolver um modelo de planeamento de uma rede de reciclagem de RCD.
- **Etapa 3 – Formulação matemática e implementação do modelo**
Com base nos modelos existentes na literatura, mais especificamente os desenvolvidos por Hiete et al. (2011), Correia et al. (2015) e Andrade et al. (2017), é desenvolvido um modelo matemático (de otimização) que é implementado no sistema GAMS (*Generic Algebraic Modeling System*). É nesta etapa que são mencionados os pressupostos do modelo.
- **Etapa 4 – Recolha de dados e validação do modelo**
Nesta etapa são coletados e tratados os dados relativos aos RCD na AML. De seguida, o modelo é validado utilizando um conjunto de dados reduzido, o que facilita a análise dos resultados e a avaliação sobre se o modelo traduz a realidade.
- **Etapa 5 – Aplicação do modelo e análise dos resultados**
Após o modelo ter sido desenvolvido e validado, é resolvido para os dados da AML, sendo criados diferentes cenários possíveis para a GRCD nesta área metropolitana. Finalmente, efetua-se a análise e discussão dos resultados obtidos, incluindo uma análise de sensibilidade aos parâmetros mais importantes do modelo.

1.4 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Introdução**

O primeiro capítulo enquadra o trabalho, contextualizando o tema, destacando os principais objetivos e definindo a metodologia e a estrutura da dissertação.

- **Capítulo 2 – Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (GRCD)**

Neste capítulo é feita uma análise da GRCD, sendo introduzidos importantes conceitos relativos aos RCD e apresentada a legislação a nível europeu e nacional, além de serem analisadas as estratégias decorrentes desta gestão.

- **Capítulo 3 – Revisão de Literatura**

No capítulo 3 é feita a revisão do estado da arte, ou seja, é analisada a literatura referente à GRCD, com particular ênfase no funcionamento das centrais de reciclagem e nos modelos de otimização desenvolvidos anteriormente.

- **Capítulo 4 – Modelo para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD com fator temporal**

No quarto capítulo é apresentado o modelo de otimização desenvolvido, sendo que inicialmente é feita uma análise detalhada dos modelos de Correia (2013) e Andrade (2015). Em seguida é descrita a abordagem deste trabalho, finalizando-se o capítulo com a formulação matemática do modelo em que foi acrescentada a componente temporal.

- **Capítulo 5 – Aplicação do modelo à Área Metropolitana de Lisboa**

O capítulo 5 começa por apresentar os dados de *input* utilizados. A seguir o modelo é aplicado a um conjunto de dados reduzido, contendo 10 freguesias da AML, com a finalidade de efetuar a sua validação. Em seguida, o modelo é aplicado às 211 freguesias da AML, sendo analisados diferentes cenários para a GRCD nesta área metropolitana.

- **Capítulo 6 – Conclusões e desenvolvimentos futuros**

Por fim, no sexto e último capítulo são extraídas as principais conclusões da dissertação, além de serem apresentadas as possíveis direções para a elaboração de novos trabalhos.

2. Gestão de Resíduos de Construção e Demolição (GRCD)

Neste capítulo é feita uma contextualização sobre a GRCD e sua importância, definindo e descrevendo alguns fatores essenciais para essa gestão. Desta forma, o capítulo está dividido em quatro secções, começando pela secção 2.1, que retrata os resíduos de um modo geral e apresenta estatísticas relativas a estes. A segunda secção caracteriza a gama dos Resíduos de Construção e Demolição que será estudada neste trabalho. Na secção 2.3 é apresentado o enquadramento legal acerca da GRCD na UE e em Portugal. Por fim, na última secção deste capítulo é feita uma caracterização da GRCD.

2.1 Resíduos

Todos os anos são produzidos milhares de milhões de toneladas de resíduos na Europa e no mundo, sendo que grande parte destes não recebe o tratamento adequado e acabam despejados em aterros a céu aberto ou incinerados. Uma gestão eficaz destes materiais é de extrema importância, de modo a maximizar a reutilização ou reciclagem e a reduzir a sua produção. O descarte dos resíduos de modo inconsciente possui diversas consequências, como poluição de solos e águas, emissão de gases poluentes e necessidade de mais matérias-primas, todos estes fatores afetando o meio ambiente e a saúde humana negativamente.

Existem diversas formas de definir o que são resíduos, e segundo o Decreto-Lei n° 73/2011, de 17 de junho, resíduos são “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer.”. Neste subcapítulo são apresentadas estatísticas relativamente à produção e tratamento dos resíduos na UE e em seus Estados-Membros.

2.1.1 Produção de Resíduos

Conforme os dados da tabela 1, foram produzidos 2.537 milhões de toneladas de resíduos em 2016, pelos 28 países que compunham a UE até janeiro de 2020. Este valor está em crescimento desde 2008, mas ainda assim é inferior à produção de 2004 e 2006. Desta quantidade total, quase 40% desses resíduos são produzidos por apenas três países, designadamente pela Alemanha, França e Reino Unido. Em Portugal, assim como na UE, a geração de resíduos tem crescido nos últimos anos, com um aumento de 8% entre 2010 e 2016 (Eurostat, 2020a). A produção de resíduos de todos os países da UE-28 encontra-se no anexo I.

Tabela 1 - Produção de resíduos em milhões de toneladas (adaptado de Eurostat, 2020a)

	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
UE-28	2.547	2.567	2.427	2.454	2.484	2.507	2.537
Alemanha	364,0	363,8	372,8	363,5	368,0	387,5	400,1
França	296,6*	312,3*	345,0	355,0	344,7	324,4	323,5
Reino Unido	298,8	291,1	282,2	241,8	241,7	263,3	277,3
Portugal	29,3*	35,0*	16,9	13,6	13,4	14,4	14,7

Com base nos dados da PORDATA (2020) e da Eurostat (2020a), a produção de resíduos pode ser agrupada em nove atividades económicas:

- Construção e demolição;
- Agricultura, silvicultura e pesca;
- Indústrias extrativas;
- Indústrias transformadoras;
- Abastecimento de eletricidade, gás, vapor e ar condicionado;
- Abastecimento de água, rede de esgotos, gestão de resíduos e atividades de remediação;
- Serviços (exceto comércio por grosso de desperdícios e sucata);
- Comércio por grosso de desperdícios e sucata;
- Resíduos domésticos (famílias).

Como pode ser observado na figura 1, destes 2.537 milhões de toneladas de resíduos produzidos em 2016, mais de um terço é oriundo das atividades de construção e demolição, correspondendo a 923,6 milhões de toneladas. Desta forma, para que seja possível realizar uma gestão eficaz dos resíduos e proteger o meio ambiente, a gestão dos RCD é profundamente relevante.

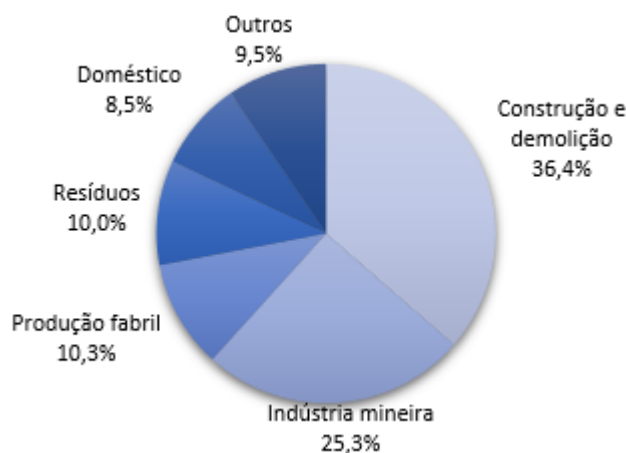


Figura 1 – Produção de resíduos por atividade económica na UE-28 em 2016 (adaptado de PORDATA,2020)

2.1.2 Tratamento dos resíduos

Relativamente ao tratamento, quase 37% dos resíduos produzidos na UE em 2016 foram reciclados, outros 10,1% foram utilizados em operações de enchimento e 5,8% aplicados na recuperação de energia (figura 2). Assim, dos resíduos que restaram, aproximadamente 46,5% foram despejados em aterros (977 milhões de toneladas) e 1% foi incinerado, demonstrando que, de um modo geral, a UE ainda tem muito que evoluir neste contexto.

Além disso, outro ponto importante relativamente a estes dados, é a discrepância em relação aos próprios países dentro do bloco econômico. Por exemplo, enquanto a Bélgica possui quase 77% de seus resíduos reciclados, e despeja em aterros apenas 6,3%, no caso da Bulgária o cenário é diametralmente oposto, com uma taxa de reciclagem de apenas 5,2% e uma deposição em aterro de

quase 95%. Vale salientar que, tal como a Bulgária, outros países da UE também precisam melhorar nestes aspectos.

Portugal está ligeiramente, de modo geral, à face da média da UE, tendo reciclado em 2016 aproximadamente 43,5% dos seus resíduos. Entretanto, os valores relativos à deposição em aterros podem melhorar, pois foram quase 3,4 milhões de toneladas que tiveram este fim (34,7%). Os valores referentes a todos os países da UE-28 encontram-se no anexo II.

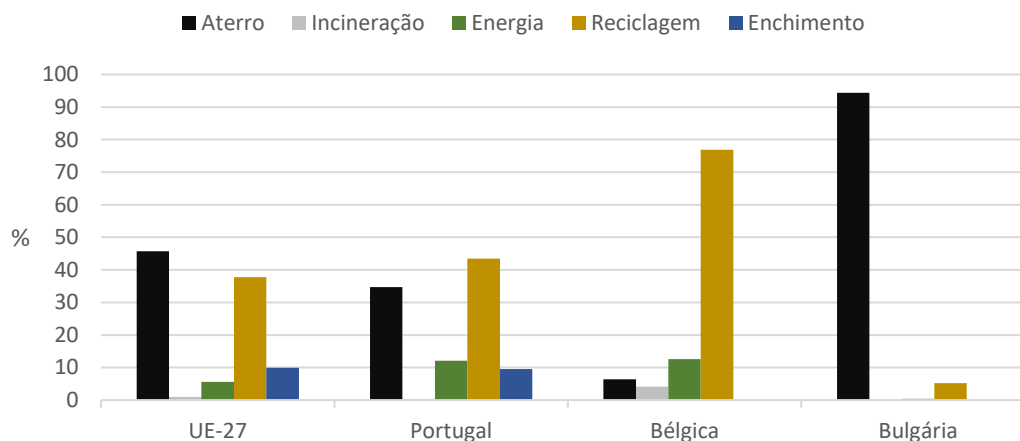


Figura 2 – Tratamento dos resíduos em 2016 (adaptado de Eurostat, 2020b)

2.2 Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Como já foi citado, os RCD são responsáveis por uma significativa parte dos resíduos produzidos em Portugal e no resto da UE, sendo gerados em grandes quantidades, e com um elevado potencial de valorização (muitas vezes desperdiçado). Além disso, o setor da construção é responsável por 24% dos recursos naturais extraídos, demonstrando novamente o peso ambiental que estes resíduos possuem (Carrola, 2017).

Estes resíduos podem ser caracterizados como resíduos provindos de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e demolição e da derrocada de edificações (Decreto-Lei n° 73/2011).

Nesta secção será feita uma descrição dos RCD, abordando algumas das suas classificações, além da composição e quantificação deste tipo de resíduos.

2.2.1 Classificação dos RCD

Existem diversas maneiras de classificar os RCD, presentes em diversas referências bibliográficas. Estas diferentes classificações podem levar em consideração as propriedades dos resíduos, de onde são originários, ou então se estes são passíveis de serem reutilizados ou reciclados. Além do mais, cada modo possui vantagens e restrições. Desta forma, a figura 3 apresenta as classificações existentes para os RCD:

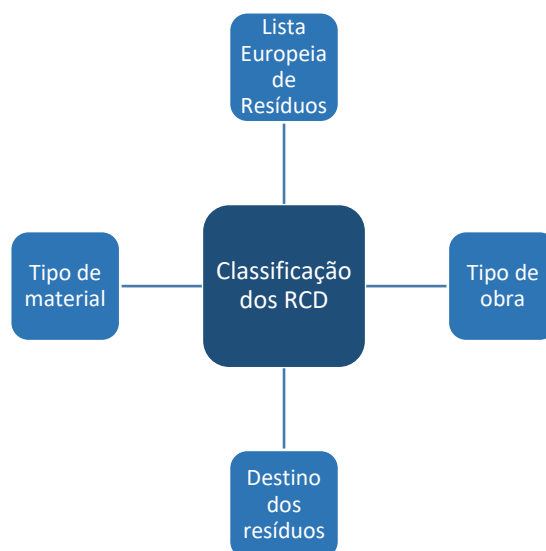


Figura 3 - Classificação dos RCD

2.2.1.1 Lista Europeia de Resíduos (LER)

A LER é uma lista que tem como principal objetivo organizar os resíduos de forma simples e harmonizada, levando em consideração a atividade de origem destes, e facilitando o entendimento do regime jurídico. A LER que está em vigor foi publicada pela Decisão 2014/955/UE, e determina que, a partir do dia 1 de junho de 2015, os países pertencentes à UE devem realizar a classificação de seus resíduos de acordo com a lista.

Os resíduos são definidos na lista por meio de códigos, sendo que cada resíduo possui um código de seis números. Os dois primeiros dígitos são referentes ao capítulo, que determina qual o tipo de atividade está produzindo este resíduo. Os dois dígitos seguintes dizem respeito aos subcapítulos e, por fim, os dois últimos dígitos servem para numerar os diferentes resíduos dentro de cada subcapítulo, como está exemplificado na tabela 2. Os RCD estão listados no capítulo 17, e sendo assim, todos possuem um código do tipo 17 xx xx, onde os quatro últimos dígitos variam de acordo com cada resíduo. O capítulo 17 completo encontra-se no anexo III.

Vale salientar que, se um material estiver presente na LER, não significa que este constitua um resíduo em todos os cenários. Este material só será considerado um resíduo quando condiz com a definição legal, ou seja, quando seu detentor se desfaz, ou tem a intenção ou obrigação de se desfazer deste material.

Outro ponto importante nesta lista é relativo aos resíduos perigosos. É considerado perigoso qualquer resíduo que possua no mínimo uma das características de perigosidade do Regulamento (UE) n° 1357/2014, e visto que existem resíduos perigosos na LER, estes estão assinalados com o símbolo (*).

Tabela 2 – Exemplo da LER (a simbologia * refere-se a resíduos classificados como perigosos)

Código	Descrição
17	Resíduos de construção e demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados)
17 02	Madeira, vidro e plástico
17 02 01	Madeira
17 02 04 (*)	Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas

2.2.1.2 Tipo de obra

Quando a classificação é feita por tipo de obra, significa que os resíduos são categorizados de acordo com a sua origem, ou seja, serão distinguidos entre resíduos de construção, de reparação e de demolição.

Os resíduos de construção são provenientes, na maioria dos casos, do excesso de matérias-primas, embalagens dos materiais de construção, desperdícios relativos aos procedimentos construtivos e avarias nos materiais durante as obras. Em casos onde é necessário fazer a remoção de solos no local da obra, estes também são considerados resíduos de construção.

Quanto aos resíduos de reparação, estes são originados em obras de remodelação, reabilitação e renovação. Uma vez que as grandes cidades estão extremamente povoadas, e existe carência de áreas para novas construções, os resíduos desta categoria estão em crescimento, juntamente com este tipo de obras. Na maioria das vezes, estes resíduos são formados por materiais de acabamentos interiores.

Por fim, os resíduos de demolição são gerados ou por atividades de demolição, ou por catástrofes naturais. Sua composição é feita maioritariamente por materiais inertes e solos.

Este tipo de classificação é extremamente simples de ser feito, visto que os resíduos já são produzidos de modo separado em cada uma das categorias. Contudo, um ponto importante a ser mencionado é que a gestão destes resíduos não possui o mesmo nível de simplicidade dentro das categorias. Por exemplo, os resíduos de construção, na maior parte das vezes, são mais fáceis de gerir, visto que todos os materiais e processos da obra são conhecidos. Em contrapartida, no caso das demolições, caso os materiais e processos da construção não sejam conhecidos, a gestão destes resíduos será dificultada.

2.2.1.3 Destino dos resíduos

Os RCD também podem ser classificados de acordo com o destino que terão. Neste caso serão distribuídos em três grupos:

- Resíduos reutilizáveis: RCD que podem ser reutilizados em obras, sem necessidade de sofrer transformações;
- Resíduos recicláveis: RCD que também podem ser reutilizados, mas é preciso que passem por transformações (químicas e/ou físicas), ou seja, que sejam reciclados;

- Resíduos não recicláveis: RCD que não podem ser reutilizados ou reciclados, em razão de não existirem técnicas ou tecnologias viáveis para realizar a reciclagem. Isto ocorre por conta das características dos materiais, ou porque estes podem estar contaminados.

2.2.1.4 Tipo de material

Por fim, outra forma de classificar os RCD é conforme o material:

- Resíduos inertes: terras, argamassas, tijolos, telhas, alvenarias, etc.;
- Resíduos não inertes: embalagens diversas, plásticos, madeiras, metais, vidros, etc.;
- Resíduos perigosos: óleos usados, latas de tintas e solventes, amianto, etc.

2.2.2 Composição dos RCD

Um dos principais fatores que dificulta a gestão dos RCD está diretamente ligado à sua heterogeneidade. Este tipo de resíduos é composto por diferentes tipos de materiais, com variadas dimensões e níveis de perigosidade. Esta composição heterogênea pode estar ligada a alguns aspectos, como por exemplo, aos diferentes métodos e técnicas que existem e podem ser utilizados em cada país e região. Outro aspecto que pode causar diversidade nos RCD é o tipo de obra:

- Nas obras de construção, a composição dos resíduos vai depender dos materiais utilizados, além dos métodos e técnicas;
- Já no caso das obras de demolição, mais fatores afetam a composição dos resíduos, como os materiais e métodos que foram utilizados na época da construção da estrutura que está sendo demolida, o tipo de utilização que a estrutura teve e, principalmente, o grau de gestão e separação dos resíduos durante a demolição;
- Os resíduos originados em obras de reparação possuem uma composição que varia muito, dependendo se será uma obra de remodelação, reabilitação ou renovação.

A Lista Europeia de Resíduos, que foi citada no capítulo anterior e está presente na Decisão 2014/955/UE, separa os RCD da seguinte maneira:

- Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos;
- Madeira, vidro e plástico;
- Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão;
- Metais (incluindo ligas metálicas);
- Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem;
- Materiais de isolamento e materiais de construção, contendo amianto;
- Materiais de construção à base de gesso;
- Outros resíduos de construção e demolição.

Na tabela 3 é apresentada a composição dos RCD produzidos em Portugal em 2015, segundo Carrola (2017). De acordo com estes valores, o betão e os materiais cerâmicos correspondem a quase metade dos RCD produzidos neste ano, e os solos, rochas e lamas de drenagem representaram cerca de um quarto da produção. Apenas estes dois grupos compõem mais de 70% dos RCD produzidos.

Tabela 3 - Composição dos RCD produzidos em Portugal em 2015 (adaptado de Carrola (2017))

Composição do resíduo	Produção (ton)	%
Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	750.386	48,2
Madeira, plástico e vidro	33.035	2,1
Misturas betuminosas e alcatrão	111.131	7,1
Metais (incluindo ligas metálicas)	50.593	3,2
Solos, rochas e lamas de drenagem	369.410	23,7
Materiais de isolamento e de construção	28.733	1,8
Materiais de construção à base de gesso	3.026	0,2
Outros resíduos de construção e demolição	211.834	13,6
Total	1.558.148	100

Segundo a Diretiva 91/689/EEC e Decisão 94/904/EEC, sobre resíduos perigosos, são poucos os materiais considerados perigosos e classificados como RCD ao mesmo tempo. Porém, embora não seja usual, os casos de RCD serem considerados perigosos podem acontecer, como é o caso dos isolamentos com base de amianto. Além disso, é possível que os RCD se tornem perigosos, seja como resultado do contacto com o ambiente no qual estavam inseridos, ou então caso tenham contacto com outros materiais considerados perigosos. Por fim, existem os materiais perigosos desde a origem, e por isso continuam sendo perigosos como resíduos (Correia, 2013).

2.2.3 Quantificação dos RCD

O primeiro passo para que se tenha uma GRCD eficiente é a quantificação dos RCD produzidos (Santos et al., 2017). Contudo, a dispersão geográfica das obras, a diversidade das tipologias de construção e o cunho temporário dificultam a fiscalização e conseqüentemente a quantificação. Nesta secção é feita uma análise da qualidade dos dados disponíveis dos RCD e da produção destes resíduos.

2.2.3.1 Qualidade dos Dados

Devido à dificuldade de quantificação dos resíduos, é importante saber a fiabilidade dos dados em análise. Deste modo, Deloitte (2017) apresenta uma análise qualitativa relativa aos dados de produção de RCD presentes na Eurostat, onde foram avaliados os métodos utilizados por cada Estado-Membro para quantificar os resíduos em questão. Nesta análise, cujo resultado está representado na tabela 4, os países foram agrupados em três categorias de acordo com a qualidade dos dados que disponibilizam: bom, moderado e fraco.

Tabela 4 – Fiabilidade dos dados da Eurostat (adaptado de Deloitte, 2017)

Bom	Moderado	Fraco
Portugal	Bélgica	Bulgária
Alemanha	Croácia	Chipre
Áustria	Espanha	Finlândia
Dinamarca	Estónia	Grécia
Eslováquia	França	Irlanda
Eslovénia	Hungria	Letónia
Países Baixos	Itália	Malta
Polónia	Lituânia	Romênia
República Checa	Luxemburgo	Suécia
	Reino Unido	

2.2.3.2 Produção de RCD

A produção de RCD não é influenciada apenas pelas práticas de cada país, mas também por outras características como economia, população e dimensão territorial (Tam e Lu, 2016). Assim sendo, além da produção global de cada país, é relevante avaliar outros parâmetros, como a produção de RCD per capita e produção por PIB.

Na tabela 5 são apresentados os valores de 2014 referentes à produção de RCD, população e PIB em paridade de poder de compra (PPC) dos nove países da UE que tiveram a qualidade dos seus dados classificada como boa (tabela 4), com base em estudo realizado por Sáez & Osmani (2019).

Tabela 5 – Produção de RCD, per capita e por PIB em 2014 (adaptado de Sáez & Osmani, 2019)

País	RCD (M toneladas)	PIB (PPC)	População ($\times 10^6$)	RCD/PIB	RCD per capita
Portugal	0,93	219.990,2	10,43	4,21	0,09
Alemanha	90,97	2.806.272,0	80,70	32,42	1,13
Áustria	9,77	307.338,4	8,51	31,79	1,15
Dinamarca	4,20	198.482,3	5,62	21,18	0,75
Eslováquia	0,35	115.674,1	5,40	3,00	0,06
Eslovénia	0,12	47.280,8	2,06	2,52	0,06
Países Baixos	23,78	606.916,8	17,08	39,19	1,39
Polónia	4,28	717.518,1	38,02	5,96	0,11
República Checa	2,45	250.064,6	10,40	9,81	0,24

Embora a produção total de RCD apresente grande variação de país para país, ao analisar a produção de RCD per capita os valores variam entre 0,06 e 1,39 de toneladas per capita, demonstrando que a produção de resíduos está diretamente ligada à população do país. Outro parâmetro importante é a

produção de RCD por PIB, em que os valores destes nove países variam entre 2,52 e 39,19 de RCD por PIB (PPC), demonstrando que a quantidade de RCD produzida está vinculada à economia do país.

2.3 Quadro legal

A fiscalização é um fator crucial para que exista uma boa gestão dos RCD. Nesta secção são abordadas as medidas tomadas pela UE e pelo governo português nos últimos anos, relativamente ao tratamento que os RCD devem receber.

2.3.1 União Europeia (UE)

A UE tem tomado muitas providências nos últimos anos no contexto dos resíduos. Com a finalidade de reduzir o consumo de recursos naturais, e consequentemente melhorar a qualidade ambiental e proteger a saúde humana, a União tem discutido e aprovado algumas Diretivas, de modo a influenciar que os seus Estados-Membros façam uma melhor gestão de resíduos, promovendo uma maior reciclagem e reutilização destes. Assim sendo, os RCD também são um ponto relevante nestas discussões, visto que, somente em 2016, foram responsáveis por mais de 36% do total de resíduos na UE (Eurostat, 2020a).

Na Diretiva 2008/98/CE (que revoga as Diretivas 91/689/CEE e 2006/12/CE), do Parlamento Europeu e do Conselho da UE, relativa aos resíduos em geral e como estes devem ser tratados na Comunidade Europeia, o principal ponto referente aos RCD está no Artigo 11º, na alínea 2.b), onde está determinado que cada Estado-Membro deve tomar as medidas para atingir “até 2020, a preparação para a reutilização, reciclagem e valorização de outros materiais, incluindo operações de enchimento utilizando resíduos como substituto de outros materiais, de resíduos de construção e demolição não perigosos, com exclusão de materiais naturais definidos na categoria 17 05 04 na lista de resíduos, sofrem um aumento mínimo de 70% em peso”. Ou seja, com exclusão dos solos, rochas e dos resíduos perigosos, os países que compõem a UE devem reutilizar, reciclar ou valorizar no mínimo 70% dos RCD produzidos, e esta meta deveria ser alcançada até 2020.

Atualmente encontra-se em vigor a Diretiva (UE) 2018/851, de maio de 2018, que altera a Diretiva 2008/98/CE. Relativamente à alínea citada no parágrafo anterior, não foram feitas mudanças, mas novas alíneas foram adicionadas acerca dos RCD:

- No Artigo 9º, que é relativo à “Prevenção de resíduos”, é dito na alínea 1.f) que a produção de resíduos em processos de construção e demolição deve ser reduzido, levando em conta as melhores técnicas disponíveis em cada um dos países;
- No nº 1 do Artigo 11º, foi acrescentado um parágrafo, informando que os Estados precisam promover uma demolição seletiva, com o propósito de realizar uma remoção e manipulação segura das substâncias perigosas, facilitar uma reciclagem e reutilização de alta qualidade, e criar sistemas de triagem de RCD, pelo menos para alguns materiais (madeira, betão, tijolos, ladrilhos, telhas, materiais cerâmicos, pedra, metal, vidro, plástico e gesso);

- No mesmo Artigo 11º, ocorreu outra alteração, que foi a adição do nº 6. Neste novo número é explicitado que a Comissão da UE pondera fixar novas metas até o dia 31 de dezembro de 2024 quanto à preparação para a reutilização e reciclagem para diversos resíduos, incluindo os RCD.

2.3.2 Portugal

O primeiro passo no contexto de gestão de resíduos em Portugal foi realizado em 1985, quando foi aprovado o regime jurídico de gestão de resíduos, pelo Decreto-Lei nº 488/85. Entretanto, este documento foi revogado em novembro de 1995 pelo Decreto-Lei nº 310/95, que foi aprovado de modo a transpor para a ordem jurídica interna o que havia sido definido nas diretivas europeias. Este decreto ficou em vigor por quase dois anos, até que em setembro de 1997 foi publicado um novo decreto para estabelecer as regras gerais de gestão de resíduos (Decreto-Lei nº 239/97). Neste ano também foram publicadas duas portarias importantes para a evolução legal da gestão de resíduos, sendo uma responsável por estabelecer as regras de transporte de resíduos (Portaria nº 335/97) e a outra por aprovar a lista europeia de resíduos (Portaria nº 818/97).

Nos anos seguintes, mais decretos foram aprovados e portarias publicadas visando melhorar a gestão dos diversos tipos de resíduos, e em 2006 foi aprovado o Decreto-Lei nº 178/2006, revogando o decreto que havia sido aprovado em 1997, estabelecendo um novo regime geral de gestão de resíduos e definindo os princípios gerais de gestão de resíduos. Por fim, o Decreto-Lei nº 73/2011 procedeu à alteração deste decreto de 2006 de modo a transpor a Diretiva nº 2008/98/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa aos resíduos.

Entre os anos de 1985 e 2008, a GRCD era feita da mesma maneira que a gestão dos restantes resíduos e obedecendo ao decreto que estivesse vigente. Contudo, por conta da grande proporção de RCD produzidos, juntamente com a sua difícil gestão (por conta da sua composição heterogênea e produção geograficamente dispersa), ficou notória a necessidade de criar um regime legislativo específico para os RCD, visando reduzir sua produção e deposição ilegal.

Deste modo, foi elaborado um regime de gestão de RCD em 2008, aprovado pelo Decreto-Lei nº 46/2008 e posteriormente alterado pelo Decreto-Lei nº 73/2011. O objetivo deste decreto é estabelecer o regime das operações de GRCD, compreendendo a sua prevenção e reutilização, além das operações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação (Artigo 1º do DL nº 73/2011).

2.4 Definição e Estratégias da GRCD

A Gestão de Resíduos está plasmada no Decreto-Lei nº 73/2011 como “a recolha, o transporte, a valorização e a eliminação de resíduos, incluindo a supervisão destas operações, a manutenção dos locais de eliminação no pós-encerramento, bem como as medidas adoptadas na qualidade de comerciante ou corretor”. Além disso, existem outras quatro componentes referidas no Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR), de 2011, que também são parte integrante da Gestão de Resíduos. Estes elementos são: as políticas ambientais, a prevenção da produção dos resíduos, a legislação existente e a regulação das atividades desta gestão (figura 4).

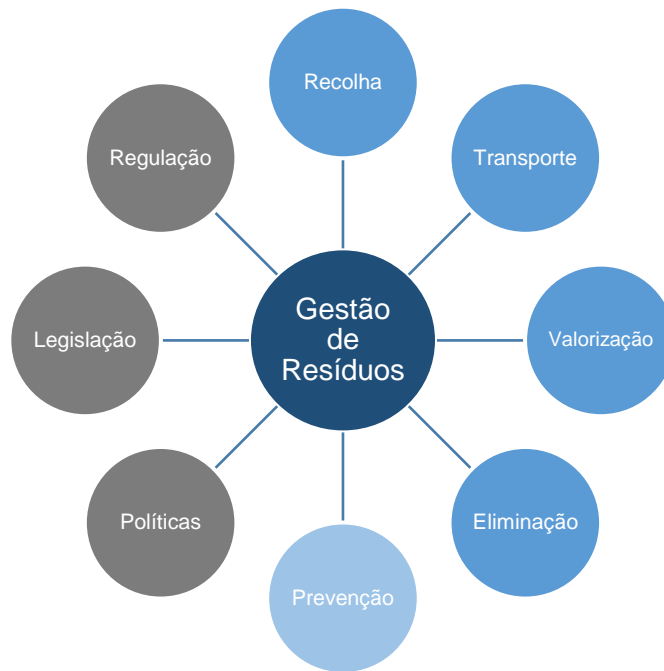


Figura 4 - Componentes da Gestão de Resíduos (adaptado de PNGR, 2011)

Para realizar uma GRCD eficaz e de qualidade existem diferentes estratégias, e alguns dos princípios utilizados nestas estratégias são: Princípio dos 3 R's, abordagem do ciclo de vida e princípio do poluidor-pagador.

2.4.1 Princípio dos 3 R's

A hierarquia de gestão de resíduos, que está representada na figura 5, apresenta de forma ordenada as ações que devem ser tomadas no tratamento dos resíduos de modo a minimizar o impacto ambiental. Os 3 R's são referentes às ações localizadas no topo da hierarquia (reduzir, reutilizar e reciclar).

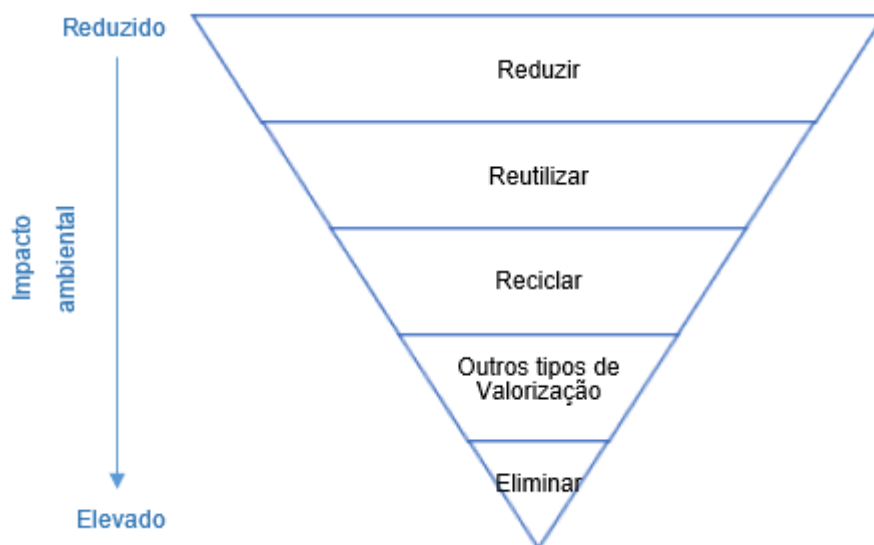


Figura 5 – Hierarquia de gestão de resíduos (adaptado de PNGR, 2011)

Reduzir a produção de RCD está no topo da hierarquia por ser considerada a maneira mais eficaz e eficiente da GRCD. A partir do momento em que a produção de resíduos é reduzida, muitos benefícios ambientais são gerados, como a redução da poluição por conta da produção e do transporte dos resíduos, um menor gasto de energia e uma menor taxa de deposição de resíduos em aterros.

Reutilizar e reciclar são as melhores opções depois da redução, sendo que a diferença entre estas duas ações é que, no caso da reutilização, o resíduo é utilizado na obra com a mesma ou outra função que teve anteriormente, mas sem que seja necessário sofrer transformações físicas e/ou químicas, e no caso da reciclagem o material só irá ser utilizado novamente após algum tipo de processo industrial. Deste modo, ambas opções auxiliam na preservação do meio ambiente ao minimizar a extração de matéria prima, a poluição por transporte e a deposição de resíduos em aterros, mas a reutilização é mais sustentável por não ser preciso qualquer tipo de tratamento.

Por fim, em casos onde a redução, reutilização e reciclagem não são possíveis ou viáveis, a melhor alternativa é procurar alguma forma alternativa de valorização do resíduo, como a incineração, que embora emita gases poluentes, é melhor que a eliminação (deposição em aterros).

2.4.2 Abordagem do Ciclo de Vida

O ciclo de vida de um edifício vai desde a fase do projeto até a sua demolição (figura 6), e visto que todas as etapas deste ciclo consomem recursos e produzem resíduos, a GRCD precisa levar em consideração cada uma delas. De acordo com Bragança et al. (2011), é na etapa do projeto que é determinado o desempenho do edifício ao longo da sua vida, e Osmani et al. (2008) estimam que 33% dos RCD estão direta ou indiretamente ligados com esta mesma etapa.



Figura 6 – Ciclo de Vida de Construções

2.4.3 Princípio do Poluidor-Pagador

Este princípio é baseado na tarifação de resíduos, ou seja, qualquer detentor de resíduos que deseje depositá-los em aterros públicos terá de pagar uma taxa. Deste modo, os produtores de resíduos evitam a deposição por conta do fator econômico, e são encorajados a realizar a redução, reutilização e reciclagem (princípio dos 3 R's), desde que exista uma fiscalização rigorosa para evitar a deposição ilegal.

A tabela 6 apresenta, para alguns países da Europa no ano de 2016, valores relativos à taxa de deposição de resíduos, em geral, em aterros (Eurostat, 2020b) e o preço que deve ser pago pelo detentor dos resíduos para realizar a deposição (CEWEP, 2017). Em países como Bélgica e Alemanha, a proporção de deposição em aterros é inferior a 20%, sendo que na Bélgica o preço médio de deposição é elevado (84,53 €/ton) e na Alemanha nem é permitida a deposição de resíduos recicláveis. Já em países com custos de deposição reduzidos ou que começaram a cobrar taxas recentemente, a deposição em aterro chega quase a 95% (Bulgária, Grécia e Romênia).

Em Portugal foi estabelecido em 2015 uma taxa de deposição em aterros de 5,50€/ton, valor esse que deve crescer anualmente em 1,10€/ton. Deste modo, em 2016 o preço de deposição em aterro em Portugal era de 6,60€/ton, valor que pode ser considerado baixo. Contudo, a proporção da deposição em aterros no país é de 34,7%, que embora não seja um valor elevado, ainda pode melhorar.

É importante frisar que, por mais eficaz que o princípio do poluidor-pagador seja, como pode ser observado com base nestes dados, existem exceções, como os casos de Malta e Finlândia, onde no primeiro país a proporção de resíduos depositados é de apenas 17,2% mesmo sem cobrar taxa pela deposição, e no país nórdico a taxa de deposição é elevada mesmo com o alto valor cobrado.

Tabela 6 – Proporção percentual e preço de deposição em aterros de resíduos (adaptado de Eurostat (2020b) e CEWEP (2017))

	Proporção da deposição em aterros (%)	Preço de deposição em aterros (€/ton)	Observações
Alemanha	18,1	Proibido	Proibidos para resíduos recicláveis
Bélgica	6,4	84,53	Preço médio; valor varia de acordo com a região do país
Bulgária	94,4	20	Preço de 2017
Grécia	94,8	35	Início da cobrança da taxa em 2014
Romênia	94,1	0	Em 2018 começou a cobrar uma taxa de 26 €
Finlândia	88,0	70	Preço de 2017
Malta	17,2	0	
Noruega	19,5	0	Cobrava uma taxa até o final de 2014 que foi revogada
Portugal	34,7	6,6	Preço subindo 1,10 € anualmente desde 2015

3. Revisão da Literatura

Neste capítulo é feita a revisão de literatura da GRCD, focada nos modelos de otimização já existentes. Assim, o capítulo está dividido em quatro secções, sendo inicialmente apresentada uma visão global dos estudos existentes na literatura. A secção 3.2 aborda alguns aspectos da reciclagem de RCD, e na secção seguinte é feita uma caracterização das centrais de reciclagem. Finalmente, na quarta secção são analisados os modelos de otimização relativo à GRCD existentes na literatura.

3.1 Visão Geral dos Estudos de RCD

Este subcapítulo centra-se num estudo realizado por Wu et al. (2019), onde foram analisados artigos relativos aos RCD publicados desde a década de 1990 até 2018, para entender a situação atual e explorar as possíveis oportunidades de estudos referentes a este tipo de resíduos.

Os diversos artigos examinados abordam variados aspectos dos RCD, como as práticas de GRCD nas economias globais, o fluxo de materiais desde a produção dos resíduos até seu destino e a performance da GRCD na perspectiva da sustentabilidade, viabilidade e eficiência. Além disso, alguns estudos avaliaram as características físicas dos RCD, como testes e melhorias relativos à durabilidade e resistência dos materiais reciclados.

Para realizar a análise, Wu et al. (2019) agruparam os artigos em duas categorias, sendo a primeira constituída pelos artigos que possuem uma perspectiva geral da GRCD, e a segunda categoria composta pelos estudos que focam em aspectos específicos da gestão, como métodos de quantificação ou possíveis aplicações dos agregados reciclados. Deste modo, após a análise minuciosa dos estudos considerados relevantes, foram identificados cinco temas, de modo a classificar os artigos:

- Preocupações ambientais relativas aos RCD do ponto de vista da ciência e engenharia ambiental;
- Reciclagem dos RCD na perspectiva da ciência e engenharia dos materiais;
- Sustentabilidade dos RCD na perspectiva da ecologia industrial;
- Otimização da GRCD do ponto de vista da gestão;
- Redução da produção dos RCD na perspectiva da arquitetura e engenharia de construções.

3.2 Reciclagem dos RCD

Nesta secção é feita uma caracterização da reciclagem dos RCD, sendo analisados dados da UE e posteriormente apresentados os benefícios e danos causados pelos processos de reciclagem, além de expor as variadas barreiras existentes que impedem que a reciclagem destes resíduos seja ainda maior.

3.2.1 Estatísticas da Reciclagem dos RCD

Na figura 7 são apresentadas taxas de tratamento dos RCD nos países da UE em 2012, de acordo com dados da Deloitte (2017). Segundo estes valores, dos 28 Estados-Membros, 15 alcançaram a meta de

70% estipulada pelo Parlamento Europeu, incluindo Portugal. Contudo, esses valores variam de acordo com os estudos, principalmente por conta da deposição ilegal dos resíduos, o que dificulta a quantificação destes dados. Vale frisar que, por mais que Portugal apareça como tendo alcançado os 70% de reciclagem, mais de 25% dos RCD são depositados em aterro (Deloitte, 2017), comprovando que ainda é preciso melhorar.

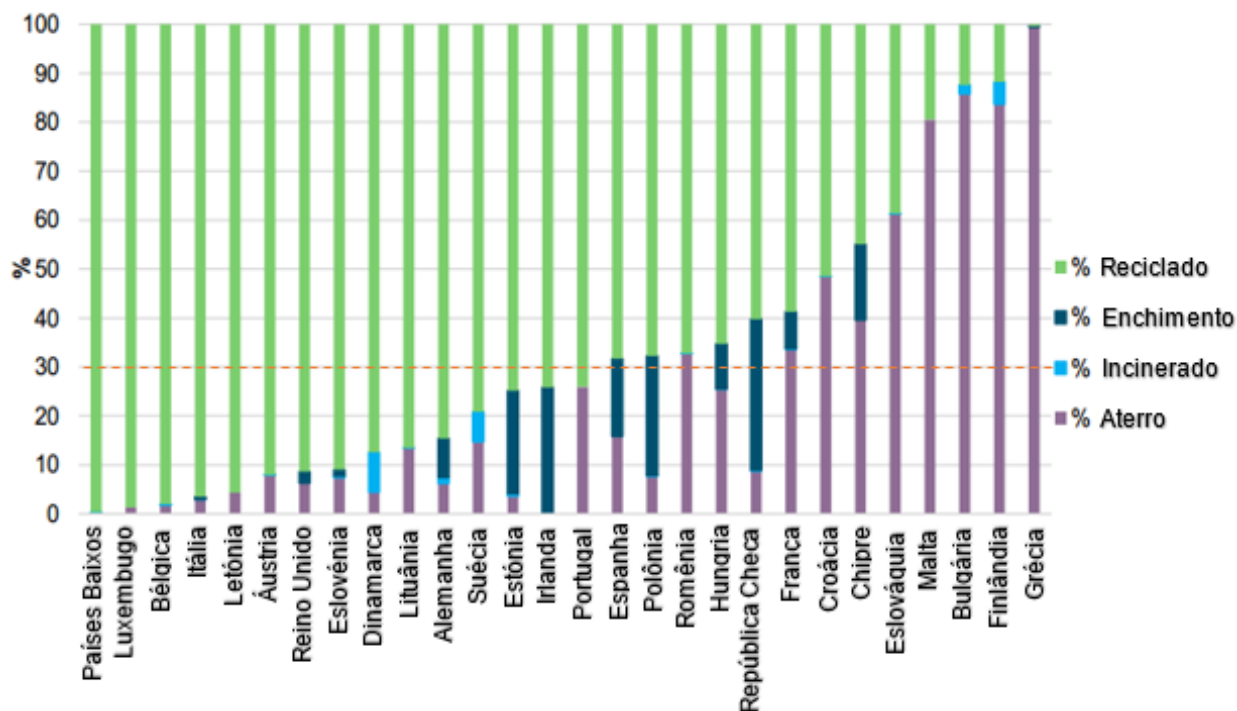


Figura 7 – Tratamento dos RCD na UE-28 em 2012 (adaptado de Deloitte,2017)

3.2.2 Impactes Ambientais Positivos e Negativos da Reciclagem de RCD

A sustentabilidade no setor da construção e demolição considera todos os benefícios e danos causados pelas operações que envolvem a atividade, dando prioridade às operações com impacto positivo. Nesta perspectiva é de salientar que a reutilização e reciclagem dos RCD contribuem com quatro benefícios enormes no aspecto ambiental (Silva et al., 2017): (1) redução do uso de recursos naturais, que são finitos; (2) redução no consumo de energia, principalmente por conta da energia gasta na extração de recursos naturais; (3) minimização na quantidade de resíduos despejados em aterros; (4) redução do transporte de recursos naturais, geralmente extraídos em locais mais afastados.

Contudo, por mais que a reciclagem dos RCD gere variados benefícios ambientais, o transporte e processamento dos resíduos também possui aspectos negativos que devem ser analisados e se possível mitigados. Assim, Coelho & de Brito (2013a) agruparam os impactos ambientais em três categorias: incorporado, operação e transportes. Os impactos incorporados correspondem à energia primária consumida e às emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), desde a extração dos resíduos naturais até a chegada na central de reciclagem, excluindo os transportes entre o local de

obra e a central. Os gastos de energia e as emissões causados pela produção e manutenção da maquinaria da central também são incluídos nesta categoria.

Os impactos operacionais estão substancialmente ligados ao consumo de energia elétrica das máquinas da central, e ao combustível utilizado por alguns dos equipamentos. Por fim, os impactos de transporte decorrem das viagens realizadas por camiões desde os locais de obra até às centrais de reciclagem, e das centrais até os aterros e/ou destinos dos materiais reciclados.

3.2.3 Barreiras à Reciclagem dos RCD

Mesmo que a reciclagem dos RCD seja vista de maneira positiva, existem barreiras que dificultam este regime, e que podem variar consoante a região. De acordo com um estudo realizado por Kartam et al. (2004), no Kuwait, as principais barreiras à reciclagem dos resíduos são: (1) contaminação dos resíduos que poderiam ser reciclados; (2) custos relativos aos transportes dos RCD e dos materiais reciclados, que podem ser elevados de acordo com a localização das centrais de reciclagem; (3) custos da triagem, transformação dos resíduos e eliminação das matérias residuais; (4) competitividade dos recursos naturais, que podem ser mais baratos ou possuir uma maior qualidade do que os materiais reciclados.

Já Huang et al. (2018) analisaram as barreiras de reutilização e reciclagem de RCD na China, e cita as principais como sendo a falta de conhecimentos para reutilização dos RCD, um sistema de gestão ineficaz e um imaturo funcionamento do mercado de reciclagem.

Finalmente, após pesquisar sobre as barreiras da reciclagem de RCD de diversos países, desde os subdesenvolvidos até aos desenvolvidos, Menegaki & Damigos (2018) concluíram que as barreiras mais recorrentes estão associadas ao custo e tempo despendidos nas centrais de reciclagem, juntamente com os baixos custos das matérias virgens. Além disso, afirma que a aplicação de leis e incentivos financeiros são os fatores mais críticos para uma GRCD adequada.

3.3 Centrais de Reciclagem

Nesta secção são analisadas as centrais de reciclagem de RCD, sendo inicialmente apresentadas as possíveis classificações destas centrais e posteriormente o modo de funcionamento.

3.3.1 Classificação das Centrais de Reciclagem de RCD

Esta secção é referente a classificação das centrais de reciclagem, e são apresentadas as duas classificações mais recorrentes na literatura, sendo a primeira conforme o tipo de central e a segunda uma classificação por níveis (de acordo com Symonds Group Ltd et al., 1999).

3.3.1.1 Tipo de Central

No caso da classificação por tipo, as centrais podem ser móveis ou fixas, e Silva et al. (2017) caracterizam cada um destes dois tipos de centrais, apresentando as respectivas vantagens e desvantagens (tabela 7), e que são apresentadas neste subcapítulo. Segundo Zhao et al. (2010), escolher entre uma central de reciclagem fixa ou móvel é uma decisão complexa, onde devem ser

considerados fatores financeiros, técnicos e ambientais, como a quantidade de RCD produzidos e os custos de transporte.

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens das centrais de reciclagem fixa e móvel (adaptado de Silva et al., 2017)

Central de Reciclagem Fixa	
Vantagens	Desvantagens
Elevada qualidade dos materiais reciclados	Maior investimento inicial
Maior capacidade de reciclagem	Maiores distâncias de transportes de materiais
Maior eficiência na separação de variados tamanhos de partículas	Produção eficiente depende de constante oferta de RCD
Central de Reciclagem Móvel	
Vantagens	Desvantagens
Menores custos de transporte	Materiais reciclados com menor qualidade
Aumento da oferta de agregados no local	Maior nível de ruídos e poeira no local da obra
Fácil deslocação dos equipamentos até outro local de demolição	Economicamente viável caso tenha oferta de RCD suficiente no local

Normalmente, as centrais móveis são formadas por um britador (em certos casos podem ser dois) e alguns equipamentos de triagem, com uma baixa eficácia na remoção da contaminação dos materiais. Em contrapartida, as centrais fixas são mais complexas, com mais trituradoras e equipamentos de limpeza e peneiração (Silva et al., 2017).

Por conta da composição heterogénea dos RCD, além da existência de materiais contaminados perigosos, o processo de reciclagem destes resíduos é complicado, e caso o material reciclado não possua uma qualidade semelhante ou melhor à das matérias primas, torna-se difícil que os potenciais compradores prefiram os materiais reciclados aos extraídos da natureza. Neste aspecto, as centrais fixas possuem vantagem, visto que os tratamentos existentes nestas centrais apresentam um maior número de processos, além de minimizarem o nível de contaminação até um grau aceitável, elevando a qualidade do produto reciclado. Outro aspecto importante das centrais fixas é o seu tamanho, pois como possuem grandes dimensões, é possível armazenar os materiais reciclados de diferentes tamanhos e qualidades, podendo suprir uma procura imediata.

Por outro lado, as centrais móveis também possuem algumas vantagens quando comparadas com as fixas. O principal benefício é a reduzida distância de transporte entre o local de obra e os equipamentos de reciclagem. Além do mais, em casos onde a qualidade do material reciclado não é relevante ou exista abundância de resíduos inertes, as centrais móveis são aconselhadas, pois reduzem os custos de transporte e as emissões de gases poluentes.

3.3.1.2 Nível da Central

Com base num estudo realizado por Symonds Group Ltd et al. (1999) relativamente à GRCD, para a Comissão Europeia, as centrais de reciclagem de RCD podem ser agrupadas em três níveis, consoante

o grau tecnológico da central e o tipo de RCD que será tratado. Esta classificação foi desenvolvida dada a existência de diversas técnicas que podem ser aplicadas na GRCD, desde simples britadores móveis que são muito úteis para agregados inertes, até centros de reciclagem fixos totalmente integrados que são capazes de lidar com todas gamas de resíduos. Na Figura 8 são ilustrados os diferentes níveis existentes, juntamente com os processos que são realizados em cada um destes níveis e os tipos de RCD que podem ser tratados. Convém salientar que as centrais não são melhores ou piores de acordo com seus níveis, mas apenas possuem processos tecnológicos diferentes e apropriados para os tipos de resíduos que serão tratados.

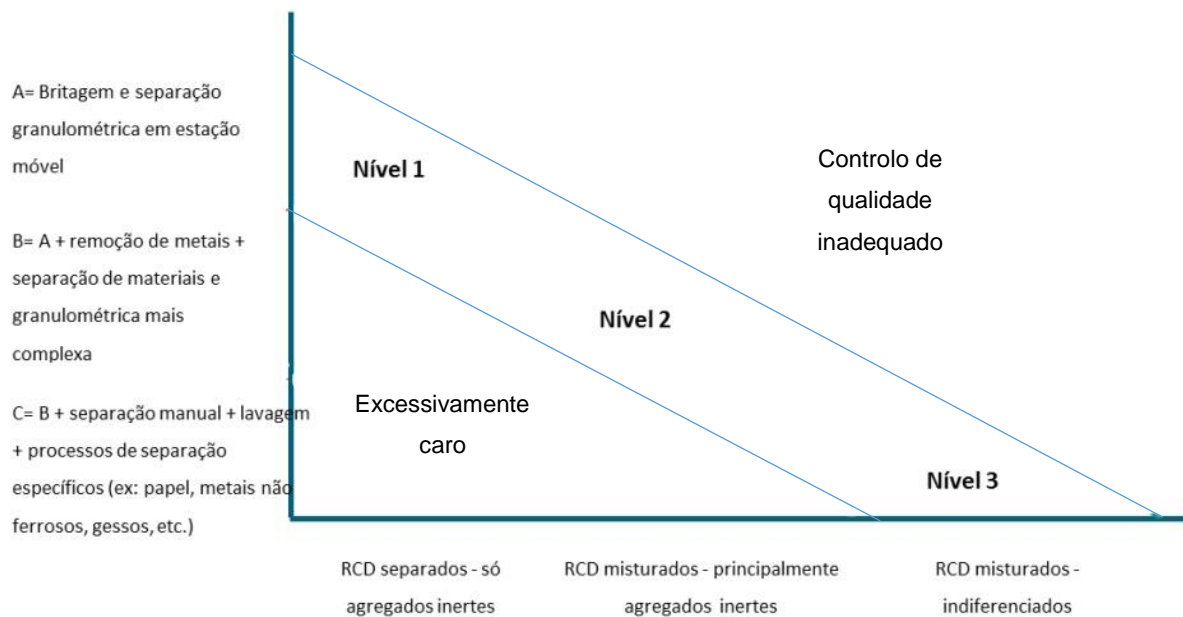


Figura 8 – Técnicas de reciclagem em função do tipo de RCD (adaptado de Symonds Group Ltd et al. 1999; Correia, 2013)

As centrais de nível 1 possuem os processos mais básicos dentre as três, sendo centrais do tipo móvel e compostas por uma operação simples de britagem e uma separação granulométrica. Este nível de centrais é apropriado para a reciclagem de RCD unicamente inertes, que podem ser utilizados em enchimentos ou sub-bases de estradas secundárias, visto que os materiais reciclados se enquadram na gama mais baixa de qualidade possível. Segundo Symonds Group Ltd et al. (1999), as principais características dos países que possuem quase exclusivamente centrais deste nível são:

- Custos de deposição em aterros reduzidos;
- Pouca fiscalização quanto à deposição ilegal;
- Baixo custo dos agregados naturais;
- Poucos britadores disponíveis para produção de derivados de RCD.

Nas centrais de nível 2 os métodos de reciclagem são mais complexos que no nível anterior, havendo processos de peneiramento e triagem mais sofisticados e sistemas de separação de metais. Estas centrais são adequadas para o tratamento de misturas de RCD que são compostas principalmente por materiais inertes, e podem gerar produtos reciclados com uma maior qualidade, possuindo uma relativa

pureza e variadas granulometrias. Deste modo, os materiais provenientes destas centrais podem ser utilizados em fundações de edifícios e camadas de revestimento. De acordo com Andrade (2015), as centrais deste nível são rentáveis em locais onde os custos de deposição em aterros e dos agregados naturais são elevados.

Por fim, as centrais do nível 3 são as mais sofisticadas, com um grau considerável de mecanização e automação, e com capacidade de receber RCD totalmente misturados e produzir materiais com alto grau de pureza, como agregados de betão (apropriado para produção de betão), agregados de cerâmica, metais ferrosos e não ferrosos (separados), papel, plástico madeira e gesso, onde apenas os materiais contaminados com substâncias perigosas e as lamas são rejeitados (Coelho & de Brito, 2013a). Estas centrais são extremamente adequadas para regiões que não permitem a deposição de resíduos recicláveis em aterros, pois são centrais capazes de reciclar qualquer tipo de resíduo.

3.3.2 Funcionamento das Centrais de RCD

Existem diversos procedimentos para realizar a reciclagem dos resíduos e podem variar de acordo com a tecnologia disponível, o nível de contaminação do material e a qualidade desejada dos materiais reciclados (Silva et al., 2017).

Nesta secção é abordado o modo de funcionamento das centrais de reciclagem de RCD, apresentando os equipamentos utilizados e os processos existentes nestas centrais.

3.3.2.1 Equipamentos

Na tabela 8 são apresentados os diferentes equipamentos que podem estar presentes em uma central de reciclagem de RCD, assim como suas funções. Estes equipamentos são apropriados para centrais fixas, visto que as centrais móveis possuem os mesmos equipamentos em versões mais simplificadas (Andrade, 2015).

Tabela 8 – Funções e tipos de equipamentos para centrais de RCD (Andrade, 2015)

Técnica/Equipamento	Função	Tipos
Separação manual	Primeira abordagem que separa materiais recicláveis e não recicláveis	
Britadeiras	Redução do tamanho dos RCD	Giratórias, de mandíbulas, de impacto, de cones, de rolos, de martelos
Alimentadores	Transporte dos RCD para a secção de britagem	Vibratório simples, de panela, de escalpe e combinações destes tipos
Separadores de metais ferrosos (magnetes)	Remover metais ferrosos dos materiais não magnéticos	Magnetes permanentes ou electromagnetes
Mesas vibratórias	Equipamento que realiza separação granulométrica	“Bananas”, mesas inclinadas e mesas horizontais
Separadores a ar	Separação de materiais leves (papel, cartão, plástico, madeira) sem criação de lamas	Gravitacionais, gravitacionais inerciais e centrífugos
Separadores de metais não ferrosos	Separa peças metálicas não ferrosas através de correntes eléctricas em circuito fechado (“eddy currents”)	
Separadores a ar pulsante	Semelhante aos separadores a ar, mas neste caso o ar é introduzido de uma fonte pulsante, separando elementos pesados uns dos outros	
Separadores em espiral	Processo de separação húmido separando os fluxos exclusivamente pela sua configuração sendo as partículas separadas por tamanho, densidade e forma	De entrada simples, dupla ou tripla

3.3.2.2 Processos

Na figura 9 é apresentado, de acordo com Coelho & de Brito (2013b), um diagrama geral de fluxo de RCD, ilustrando uma central de reciclagem de nível 3, visto que são as centrais mais complexas e sofisticadas. Este diagrama representa uma central com processamento ideal, estando apta a receber todo e qualquer tipo de RCD e extrair frações de material reciclado com alto grau de pureza. Andrade (2015) refere que, embora estes sejam considerados os processos ideais para centrais de nível 3, na prática algumas etapas podem não ser efetuadas, de acordo com o nível de capacidade da central.

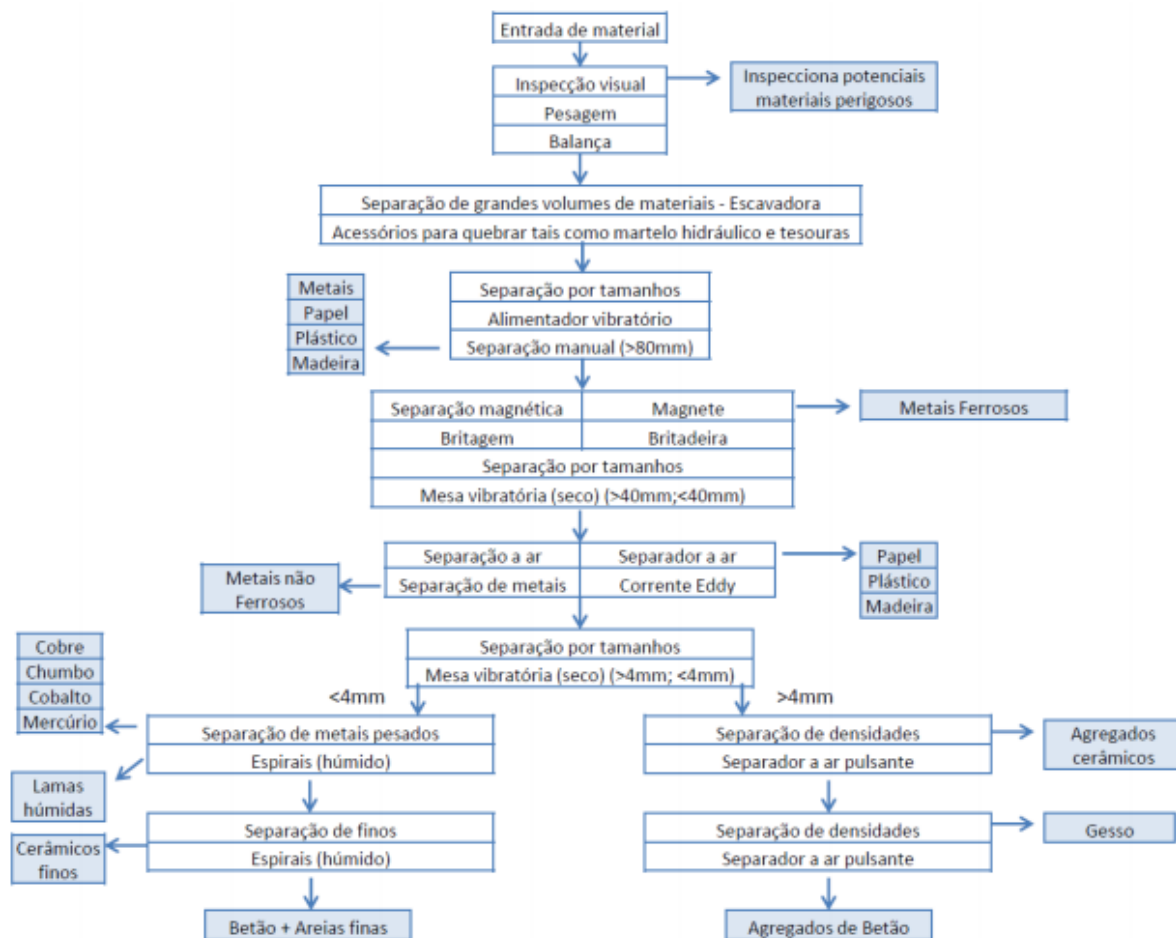


Figura 9 – Processos de uma central de nível 3 (Coelho & de Brito, 2013b; Andrade, 2015)

A seguir são analisadas algumas características dos processos de triagem e britagem, visto que são fases da reciclagem comuns às centrais de todos os níveis. Também é referida a importância do armazenamento eficiente dos RCD e dos materiais reciclados, bem como os destinos que os resíduos podem ter no caso de não ser possível reutilizá-los ou reciclá-los.

Triagem e britagem dos RCD

Existem dois cenários para os processos de triagem e britagem, que seriam o processamento no local da obra (on-site) ou na central de reciclagem (off-site). Silva et al. (2017) alegam que, embora a triagem no local da obra consuma tempo de trabalho da empresa que a realiza, este tipo de prática acarreta grandes benefícios ambientais e financeiros no processo de reciclagem. Além disso, existem centros de recolha para os RCD que recusam resíduos não triados, de modo que se torna necessária a triagem por parte da empresa que realiza a obra. Em contrapartida, realizar estes processos nas centrais de reciclagem auxilia no armazenamento dos materiais de acordo com o tipo de RCD e qualidade dos resíduos, para além da separação imediata de materiais reutilizáveis. Na tabela 9 são apresentadas algumas das vantagens e desvantagens de realizar a triagem e britagem no local da obra ou na central de reciclagem, de acordo com Symonds Group Ltd et al. (1999).

Tabela 9 – Vantagens e desvantagens da triagem e britagem no local de obra ou na central de reciclagem (adaptado de Symonds Group Ltd et al., 1999)

Triagem e britagem no local da obra (on-site)	
Vantagens	Desvantagens
Menor movimentação de materiais	Conflitos entre as operações locais e o espaço necessário para os materiais e maquinaria
Redução dos custos de transportes	Custos operacionais das máquinas, por tonelada de RCD, são maiores
Menores custos de capital da maquinaria	A obra de construção pode atrasar
Caso os materiais sejam utilizados no mesmo local da obra, diminui a perturbação causada pelo transporte na vizinhança do local de obra	Menor flexibilidade sobre quando/onde o material reciclado pode ser utilizado Aumento do ruído e pó na vizinhança da obra
Triagem e britagem na central de reciclagem (off-site)	
Vantagens	Desvantagens
Facilita a redução e/ou mitigação dos impactos ambientais adversos nas áreas envolventes	Maior movimentação de materiais
Maior controle da qualidade dos materiais reciclados	Custos fixos das centrais de reciclagem
Reduzidos custos operacionais das máquinas por tonelada de RCD	Maiores custos de transporte e de capital da maquinaria
Mais prático para utilizar uma vasta gama de equipamentos de maior capacidade	É essencial o controle adequado do processo de demolição (para não receber materiais de qualidade desconhecida)
Possibilidade de armazenar os materiais reciclados	

Armazenamento dos RCD antes e depois do processamento

De acordo com a pesquisa realizada por Silva et al. (2017), os operadores de RCD e as centrais de reciclagem necessitam de um armazenamento e categorização adequadas dos RCD, visto que, caso estes processos não sejam feitos com eficiência, resíduos de diferentes materiais e qualidades podem-se misturar, ocasionando maiores custos operacionais. Alguns aspectos que devem ser considerados ao manusear os RCD são:

- Numa fase inicial, todos RCD devem ser armazenados em contentores adequados no próprio local de obra, evitando que os resíduos se dispersem e causem transtornos à vizinhança;
- Os resíduos devem ser separados de acordo com suas características, facilitando assim sua futura reutilização ou reciclagem;
- A circulação dos RCD deve ser planeada de acordo com a capacidade de armazenamento da central de reciclagem. Caso contrário, o envio dos resíduos para a central pode provocar dificuldades no trabalho e perturbações no tráfego rodoviário.

Além dos cuidados com o armazenamento antes dos processos de reciclagem, também é importante ter cautela com o armazenamento dos materiais reciclados, de modo a prevenir a mistura e contaminação dos materiais. Alguns aspetos citados por Silva et al. (2017) são:

- Agregados reciclados derivados de materiais com diferentes qualidades devem ser armazenados separadamente;
- Recomenda-se que os agregados sejam mantidos secos até à sua utilização;
- Agregados reciclados que possuem fracções de dimensão diferente devem ser armazenados separadamente;
- O transporte dos agregados deve respeitar as recomendações anteriores e evitar rupturas e/ou misturas;
- Recomenda-se que cada conjunto de mecanismos de uma central de reciclagem processe RCD de uma determinada qualidade e tipo, evitando futuras despesas com limpeza e descontaminação.

Destino dos RCD

No caso dos RCD que não possam ser reutilizados ou reciclados, devem sofrer algum tipo de valorização ou serem eliminados. De acordo com Rocha (2016), a valorização dos resíduos consiste ou na compostagem ou na incineração, e a eliminação traduz-se na deposição controlada dos resíduos em aterro.

A compostagem implica a decomposição dos resíduos orgânicos, resultando em compostos que podem ser utilizados futuramente como fertilizantes ou corretivo de solos (Rocha, 2016). Já a incineração consiste na queima dos resíduos a altas temperaturas, na maioria das vezes com aproveitamento energético. Este tipo de valorização reduz o volume inicial de RCD em cerca de 90%, e por isso surgiu para controlar a acumulação de resíduos em aterros (Rocha, 2016; Andrade, 2015). Por fim, o destino mais indesejável dos RCD é a deposição em aterros, pois causa elevado impacte ambiental e não culmina em nenhum tipo de valorização dos resíduos.

3.4 Modelos de Otimização

Existem variados artigos referentes a modelos de otimização de gestão de resíduos, como resíduos urbanos ou eletrônicos por exemplo. Contudo, modelos aplicados especificamente à GRCD são mais recentes, sendo o desenvolvido por Hiete et al. (2011) um dos pioneiros neste campo. Assim sendo, nesta secção são analisados os modelos de otimização encontrados na literatura, e para isso foram realizadas pesquisas no Web of Science (WoS), Scopus e Google Scholar, utilizando as palavras chave “optimization of construction and demolition waste”, “optimization of construction waste” e “optimization of CDW”, além de analisar quais artigos haviam citado Hiete et al. (2011). Na tabela 10 é apresentada uma breve descrição destes modelos, e a seguir é feita uma análise mais aprofundada.

Tabela 10 – Descrição dos modelos de otimização presentes na literatura

Autor	Título	Descrição
Hiete et al. (2011)	Matching construction and demolition waste supply to recycling demand: a regional management chain model	Modelo de otimização com foco na minimização de custos no planeamento de uma rede regional de reciclagem de RCD, aplicado no sudoeste da Alemanha.
Galan et al. (2013)	Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria	Modelo com o objetivo de identificar a melhor localização para as centrais de reciclagem e estações de triagem, visando minimizar a distância de transporte médio e os custos totais. Modelo aplicado em Cantabria, na Espanha.
Correia (2013)	Optimização da gestão de resíduos de construção e demolição: Aplicação à Área Metropolitana de Lisboa	Modelo que visa expandir o modelo de Hiete et al. (2011), incluindo uma metodologia de avaliação dos impactos ambientais. Modelo aplicado à área metropolitana de Lisboa ao nível do concelho.
Andrade (2015)	Nova abordagem para a otimização da gestão de resíduos de construção e demolição: Aplicação à Área Metropolitana de Lisboa	Modelo com o objetivo de melhorar o modelo de Correia (2013), com uma recolha de dados mais extensa e completa, e sendo aplicado à área metropolitana de Lisboa ao nível da freguesia.
AlZaghrini et al. (2019)	Using GIS and optimization to manage construction and demolition waste: The case of abandoned quarries in Lebanon	Ferramenta de apoio à decisão para países em desenvolvimento, com foco de selecionar pedreiras abandonadas para servirem como centrais de reciclagem e aterros para RCD. Modelo aplicado em duas regiões do Líbano (Beirute e Monte Líbano).
Xu et al. (2019)	Reverse Logistics Network-Based Multiperiod Optimization for Construction and Demolition Waste Disposal	Modelo que emprega a rede de logística inversa visando otimizar os processos de eliminação de RCD, reduzindo custos e poluição ambiental. Modelo demonstrado na China, em múltiplos centros de eliminação de resíduos.

3.4.1 Otimização de Custos

O modelo de otimização desenvolvido por Hiete et al. (2011) permite o planeamento e avaliação de uma rede regional de reciclagem de RCD. Este modelo visa minimizar os custos, avaliar o desempenho ambiental e apresentar os efeitos causados pelas políticas de intervenção. Deste modo, o modelo de Hiete et al. (2011) determina qual seria a configuração ótima da rede de RCD, e considerou os seguintes aspectos:

- Fluxo de resíduos entre os produtores de RCD e os aterros ou centrais de reciclagem;
- Fluxo de resíduos entre as centrais de reciclagem e os aterros ou locais com procura de agregados reciclados;
- Capacidade das centrais de reciclagem;
- Custos fixos e variáveis.

Hiete et al. (2011) aplicaram o modelo no sudoeste da Alemanha, mais especificamente no estado federal de Baden-Württemberg. O modelo corresponde a um problema de programação linear inteira mista (MILP – Mixed Integer Linear Programming) e foi implementado no sistema GAMS (Generic Algebraic Modeling System).

Posteriormente, Galan et al. (2013) desenvolveram um modelo de otimização cujo objetivo é identificar a localização e a capacidade das centrais de reciclagem e das estações de triagem de uma GRCD, de modo a minimizar a distância média de transporte e os custos totais da gestão (custos de instalação, operação e deposição). A rede de GRCD deste modelo é composta pelos produtores de RCD, estações de triagem, centrais de reciclagem, aterros de RCD inertes e o mercado que utiliza os agregados reciclados. O fluxo de materiais que foi considerado é ilustrado na figura 10, onde os produtores de RCD podem enviar os resíduos diretamente para as centrais de reciclagem ou para as estações de triagem. As centrais geram dois tipos de materiais, os não recicláveis que são enviados para os aterros, e os agregados recicláveis que podem ser vendidos no mercado. As estações de triagem realizam a segregação dos RCD de modo a elevar a eficiência do processo e reduzir os custos de operação, enviando diretamente para o aterro o que não pode ser reciclado e destinando o que pode ser reciclado para as centrais de reciclagem.

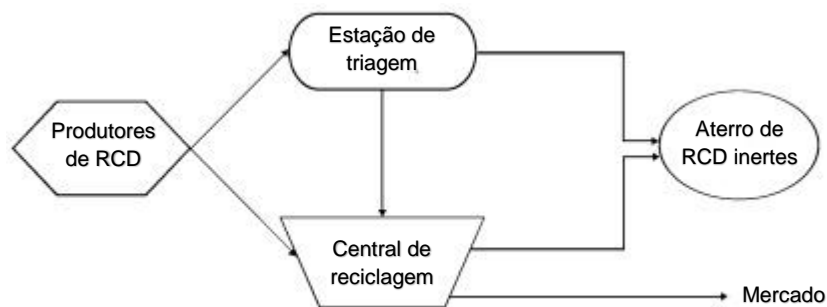


Figura 10 – Rede de GRCD do modelo desenvolvido por Galan et al. (2013) (adaptado de Galan et al., 2013))

Importa salientar que Galan et al. (2013) não consideraram na sua formulação de programação linear inteira mista (MILP), implementada em GAMS, o fluxo de materiais existente entre as centrais de reciclagem e o mercado consumidor de agregados reciclados, pois alegaram que estimar as distâncias de transporte entre as centrais de reciclagem e os mercados consumidores é complexo, visto que são mercados difusos e com localizações específicas.

3.4.2 Aspectos Ambientais

Os modelos anteriormente citados apresentam grande foco na otimização dos custos, e apesar de terem citado aspectos ambientais, não adicionaram estes fatores às suas formulações. Assim sendo, Correia (2013) desenvolveu um modelo de otimização para o planeamento de uma rede regional de reciclagem de RCD com o intuito de aplicar e expandir o modelo criado por Hiete et al. (2011), onde foi incluída uma metodologia para avaliação dos impactos ambientais, o Eco-indicator 99. Desta forma, Correia (2013) aplicou inicialmente o modelo com foco apenas na redução de custos, e posteriormente adicionou à formulação novos parâmetros para modelação das questões ambientais, como consumo de recursos naturais e emissões de poluentes (causadas pelos processos das centrais de reciclagem

e pelo transporte dos materiais) para avaliar os respectivos efeitos, impactes e danos. Em sequência, Andrade (2015) desenvolveu um modelo tendo em vista melhorar o trabalho de Correia (2013), planeando em pormenor o modo como a rede de RCD funciona e os processos implícitos, com mais detalhe na modelação dum maior número de entidades intervenientes e aplicando o modelo ao nível da freguesia da área metropolitana de Lisboa (Correia (2013) trabalhou ao nível do concelho). Para tal, procedeu a uma recolha de dados mais extensa e completa, de modo a tornar o modelo mais realista. Ambos os modelos são de programação linear inteira mista (MILP) e foram implementados em GAMS.

É importante salientar que Bernardo (2013) realizou um estudo para desenvolver um método que estime a produção regional de RCD, e aplicou-o à área metropolitana de Lisboa, obtendo valores que posteriormente foram utilizados por Correia (2013) e Andrade (2015) em seus modelos. Para realizar a estimativa, Bernardo (2013) primeiramente realizou a recolha e tratamento de dados de aproximadamente 50 obras reais de demolição, com auxílio da empresa Ambisider, que disponibilizou os dados destas obras, ocorridas entre 2008 e 2012. Em seguida foi feita uma caracterização da geração de resíduos por tipo de resíduos e por tipo de edifício (residencial ou não residencial), e por fim, utilizando os dados que possuía, juntamente com dados estatísticos do Instituto Nacional de Estatística, estimou a geração total de RCD na região (ao nível do concelho e da freguesia).

Outro estudo com grande foco nas questões ambientais foi realizado por AlZaghrini et al. (2019), cujo objetivo era criar uma ferramenta de apoio à decisão que selecione, de modo económico e ambientalmente aceitável, pedreiras abandonadas para servirem como aterros de RCD e centrais de reciclagem em países em desenvolvimento. Para isso foram utilizados dois modelos, um geoespacial e um matemático. AlZaghrini et al. (2019) mencionam que estudos anteriores implementavam apenas um dos dois modelos para selecionar os locais onde as centrais seriam instaladas, e assim os modelos não consideravam toda a cadeia de valor ou tinham resultados em áreas em que seria necessária uma análise específica do local.

O modelo geoespacial utilizado foi o Sistema de Informação Geográfica (SIG), que a partir de uma análise multicritério seleciona potenciais pedreiras que podem ser reabilitadas como centrais de reciclagem e aterros, buscando minimizar os impactos ambientais. Já o modelo matemático de otimização (modelo de MILP implementado no Gurobi) determina o conjunto de pedreiras viáveis para uso ao considerar toda a cadeia de abastecimento de agregados reciclados, com o objetivo de maximizar os lucros das centrais.

3.4.3 Rede de Logística Inversa

Outro método de otimizar a GRCD é por meio da rede de logística inversa, e Xu et al. (2019) caracterizam a estrutura desta rede da seguinte maneira:

- A rede começa com os produtores de RCD e termina com os fabricantes de materiais, centrando-se na regeneração dos materiais;
- A logística inversa coleta os materiais no fim da cadeia de abastecimento e fá-los passar pelos vários nós da cadeia inversa que sucessivamente regeneram o estado dos materiais para obter o produto reutilizável;

- Isto assegura que os resíduos não são incinerados ou despejados em aterros, reduzindo os impactos ambientais.

Assim sendo, Xu et al. (2019) empregaram uma rede de logística inversa juntamente com um método de otimização matemática (modelo de MILP implementado no software MATLAB), visando melhorar a reciclagem e reduzir tanto a poluição ambiental quanto os custos de eliminação dos RCD. A estrutura da rede utilizada no estudo, ilustrada na figura 11, considera que os RCD são primeiramente coletados nos locais de obra, seguindo para uma central de classificação e coleta, onde os resíduos são classificados de modo a saber se são recicláveis ou não. Os RCD não recicláveis são transportados para locais de eliminação, enquanto os recicláveis são levados para centrais de desmontelamento. Por fim, os materiais são enviados para os fabricantes de materiais, retornando assim ao início da cadeia de abastecimento.

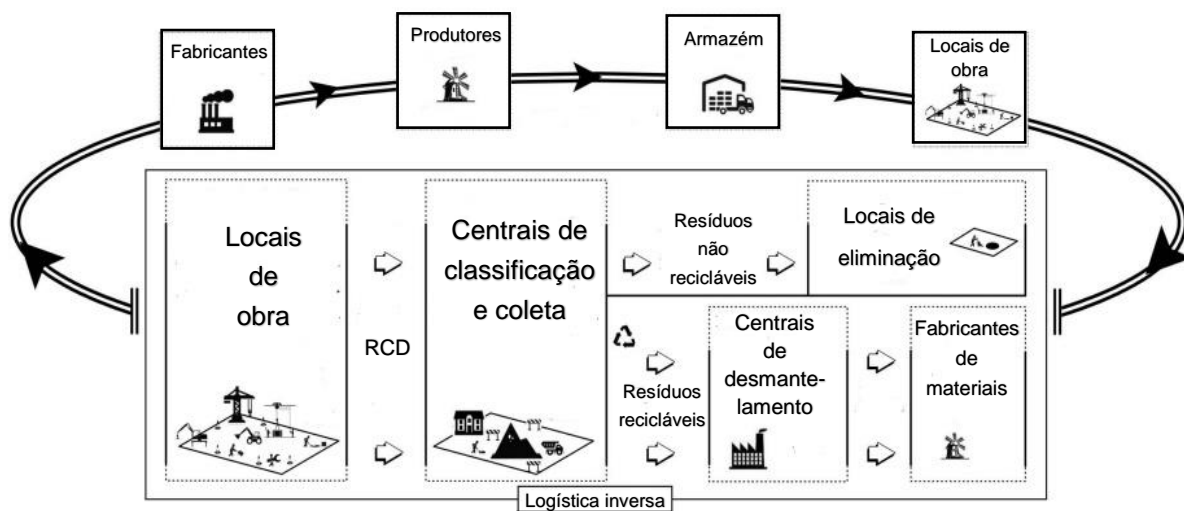


Figura 11 – Rede de logística dos RCD (adaptado de Xu et al., 2019)

4. Modelo para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD com a componente temporal

Neste capítulo é apresentado o modelo de optimização para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD com o fator temporal. Na primeira parte é feita uma breve descrição dos modelos de Correia (2013) e Andrade (2015). Em seguida são apresentados os principais componentes para o desenvolvimento do novo modelo, e por fim é exibida a formulação matemática com a sazonalidade associada.

4.1 Modelos desenvolvidos por Correia (2013) e Andrade (2015)

Nesta secção são descritos os modelos para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD desenvolvidos por Correia (2013) e Andrade (2015), que serviram de base para a elaboração da nova abordagem que é o intuito deste trabalho.

4.1.1 Modelo de Correia (2013)

Após Hiete et al. (2011) criarem um modelo de otimização que procurava minimizar os custos da cadeia de RCD, Correia (2013) aplicou este modelo à AML (mais especificamente aos 18 municípios que compõem esta região), além de adicionar uma componente capaz de avaliar os impactes ambientais causados pela rede de reciclagem, com base no Eco Indicator 99 (EI99).

Neste modelo foram considerados três tipos de materiais:

- RCD;
- Materiais processados (MP) resultantes da transformação de RCD nas centrais de reciclagem (CR);
- Material residual (MR) oriundo do processamento dos RCD nas CR.

Deste modo, existem duas opções de gestão para os RCD, que são a deposição direta em aterro ou processamento em CR de diferentes desempenhos, resultando em diferentes porcentagens de MP (que são destinados à venda) e MR (que são depositados em aterro). Na figura 12 é representada de forma simplificada o funcionamento deste modelo.

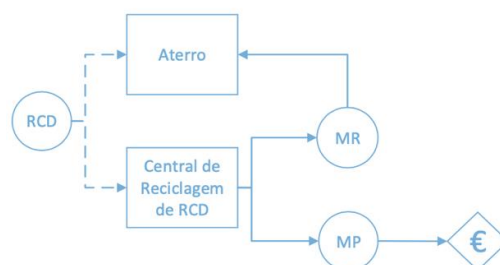


Figura 12 – Funcionamento do modelo de Correia (2013) (Andrade, 2015)

Relativamente às despesas, foram considerados quatro custos: os custos de transporte dos três tipos de materiais, os custos de investimento para construção de novas CR, os custos de processamento

dos RCD nas CR e os custos de deposição em aterro dos RCD e MR. A soma destes custos, subtraída da receita gerada pela venda dos MP, resulta no custo total da rede de reciclagem do modelo.

De acordo com Correia (2013), o modelo de programação linear inteira-mista (MILP) desenvolvido considera:

- Nós da rede caracterizados pelos seguintes atributos:
 - Produção de RCD
 - Procura dos MP
 - Número e tipo de CR
 - Número de aterros;
- Arcos definidos para todos os pares de nós, estando associado a cada arco a distância entre o correspondente par de nós;
- Custo de transporte em função da distância entre os nós;
- Custo de deposição em aterro dos RCD e MR;
- Valor de venda dos MP;
- Diferentes tipos de CR (tipo de centrais diferenciadas pela capacidade e características de transformação). Foi considerado no modelo que as CR pré-existentes não podem ser fechadas e que novas centrais podem ser construídas, desde que cada nó tenha no máximo uma central de cada tipo;
- Capacidade, custo de investimento (no caso de construção de novas CR) e custos variáveis por tipo de CR;
- Capacidade ilimitada das zonas de aterro (hipótese assumida dado que não se dispunha destas capacidades).

Assim, o modelo é capaz de decidir sobre:

- A abertura de novas CR, suas localizações e o tipo de central a instalar;
- O fluxo de materiais na rede de reciclagem, ou seja, a quantidade de materiais transportada entre cada par de nós.

4.1.2 Modelo de Andrade (2015)

Andrade (2015) utilizou os princípios da Engenharia de Processos e Sistemas (EPS) para desenvolver o seu modelo. A EPS aborda o modo como um sistema complexo se comporta como um todo, utilizando técnicas matemáticas e experimentais para criar modelos computacionais de todas as unidades de processo que integram uma cadeia de abastecimento. Estes modelos podem ser desenvolvidos para prever o comportamento global do sistema e identificar falhas, além de serem úteis para testar os resultados de diferentes alternativas de design ou mudanças no processo (Andrade, 2015).

De acordo com Duque et al. (2010), uma representação geral desta metodologia no projeto do processo é o *State Task Network* (STN), onde os processos são definidos numa rede por dois tipos de nós: os nós de estado e os nós de tarefa. Os nós de estado representam os produtos, como as matérias-primas, os produtos intermédios ou os produtos finais. Já os nós de tarefa representam as operações de

processos elementares transformando os materiais entre seus diferentes estados. O STN reconhece os estados de *input* utilizados para produzir cada estado de *output*, e juntamente com informações adicionais, como a proporção do estado do material a ser utilizada ou o tempo de processamento da tarefa, define a produção de receita.

Assim sendo, Andrade (2015) desenvolveu um modelo que resultasse nas receitas dos processos, sem considerar a componente temporal. Para isso, os principais aspectos incluídos, ou mantidos, neste modelo de modo a aprimorar o trabalho de Correia (2013) são:

- Introdução de novos materiais;
- Maior precisão geográfica, analisando a nível das freguesias;
- Visualização dos fluxos de materiais de maneira mais detalhada;
- Conservação do tipo de representação da localidade por um nó com atributos;
- Conservação da estrutura de custos, incluindo dados mais precisos.

Após uma vasta recolha de dados visando incluir os aspectos citados, Andrade (2015) percebeu que existem, além das centrais de reciclagem, centrais que realizam apenas o trabalho de triagem, sendo designadas como centrais de triagem. Além disso, foi possível perceber que não existem, na AML, centrais que realizem reciclagem de alta qualidade (HQ), reciclagem esta que permite que os produtos reciclados sejam utilizados de forma similar aos produtos que lhe deram origem. Este tipo de processo (reciclagem HQ) pode ser implementado em centrais já existentes, visto que é apenas necessário espaço para alocar as novas máquinas.

Diferentemente de Hiete et al. (2011) e Correia (2013), que consideraram as centrais como sendo instalações fixas, sem modelar os processos que aconteciam nas instalações, Andrade (2015) desagregou os principais processos que ocorrem nas centrais de triagem e reciclagem. Como pode ser visto na figura 13, as centrais de reciclagem possuem dois ou três processos, que são: triagem incorporada, reciclagem de baixa qualidade (LQ) e reciclagem HQ (existem centrais que não possuem a reciclagem HQ, possuindo apenas os dois processos iniciais).

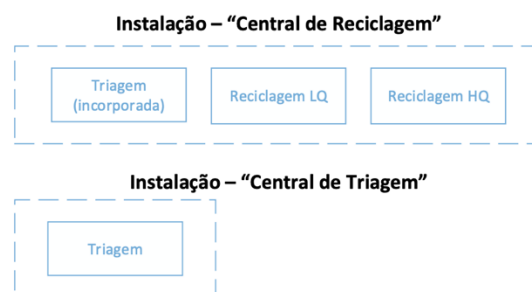


Figura 13 – Esquema dos Processos de cada central (Andrade, 2015)

As principais vantagens da abordagem por processos quando comparada com a abordagem por instalações (usada por Hiete et al. (2011) e Correia (2013)) são (Andrade, 2015):

- É possível visualizar os fluxos de materiais entre os processos, sendo viável dimensionar de forma mais eficaz as centrais;
- O modelo fica preparado para uma futura abordagem EPS mais aprofundada.

4.2 Abordagem deste trabalho – Componente temporal

Em continuidade ao modelo desenvolvido por Andrade (2015), e buscando aprofundar a abordagem segundo os princípios da Engenharia de Processos e Sistemas (EPS), é adicionado neste trabalho a componente temporal. Inicialmente foi ponderado definir a sazonalidade de acordo com as estações do ano, mas após o contato via e-mail com algumas empresas de RCD, a empresa Renascimento disponibilizou a sazonalidade de recebimento de resíduos nas suas instalações, e foi constatado que a melhor opção de modelação seria dividir o ano em 12 períodos, ou seja, de modo mensal, visto que os dados recebidos estavam neste formato. Desta forma, neste trabalho são considerados 12 períodos, correspondendo assim a um ano.

Segundo as informações obtidas, os meses de janeiro e dezembro são os que possuem menor fluxo de materiais, somando 10% dos resíduos do ano. Já maio, junho, julho e agosto são os meses com maior incidência de materiais, totalizando nestes quatro meses metade da quantidade de resíduos anual. Por fim, os restantes 40% de RCD produzidos anualmente são distribuídos nos seis meses não citados. Na tabela 11 são apresentados os valores percentuais de produção de RCD em cada um dos meses. Por conta da dízima infinita periódica causada pelos 40% distribuídos por seis meses, foi necessário fazer uma aproximação de modo que a soma das percentagens desse 100% e não afetasse o modelo. Assim, os valores percentuais utilizados são os da terceira coluna (% utilizada).

Tabela 11 – Percentagem de produção de RCD mensal (Dados fornecidos pela empresa Renascimento e percentagem utilizada no modelo)

Mês	%	% utilizada
Janeiro	5,00	5,00
Fevereiro	6,67	6,70
Março	6,67	6,70
Abril	6,67	6,70
Maio	12,50	12,45
Junho	12,50	12,45
Julho	12,50	12,45
Agosto	12,50	12,45
Setembro	6,67	6,70
Outubro	6,67	6,70
Novembro	6,67	6,70
Dezembro	5,00	5,00
Total	100,02	100,00

4.2.1 Materiais e Layout dos processos

De modo similar ao trabalho do Andrade (2015), são considerados no modelo 14 tipos de materiais e 5 processos (os 4 processos citados na secção 4.1.2 além do processo de deposição em aterro). Na figura 14 é apresentado o layout que é considerado no modelo, sendo possível observar a ligação entre os diferentes materiais (que estão listados na tabela 12) e os processos existentes. Em seguida é feita uma explicação mais detalhada do layout considerado. Importa salientar que as setas que aparecem a tracejado representam que o material tem mais de um destino possível, que é o caso dos RCD (podem ir para triagem ou aterro) e de S10 (pode ir para reciclagem HQ ou ser vendido).

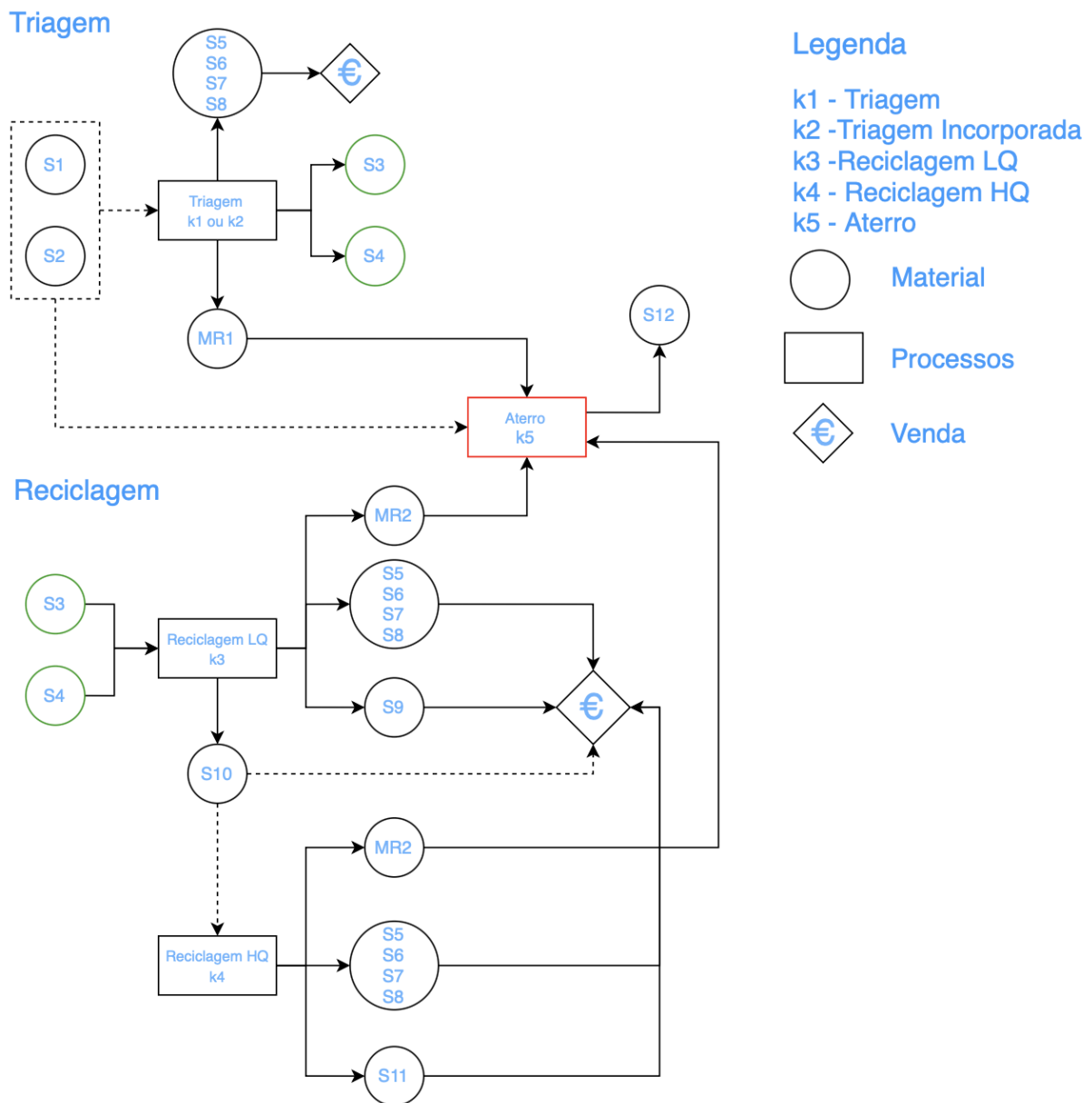


Figura 14 – Layout dos processos do modelo (adaptado de Andrade (2015))

Tabela 12 – Materiais considerados no modelo de Andrade (2015) (adaptado de Andrade, 2015)

Materiais		Descrição
S1	Betão	Fluxo de material inerte constituído maioritariamente por betão (cerca de 80%).
S2	Material indiferenciado	Fluxo de material inerte constituído maioritariamente por misturas de betão e material cerâmico com densidade superior a 0,6.
S3	Betão triado	Material que foi sujeito a processo de triagem e que está apto a poder ser reciclado.
S4	Indiferenciado triado	Material indiferenciado que foi sujeito a processo de triagem e que está apto a poder ser reciclado.
S5	Misturas de metais	Ferro, alumínio, cobre, etc.
S6	Madeira	Materiais que resultam dos vários processos e que são vendidos.
S7	Plástico	
S8	Papel e cartão	
S9	Indiferenciado LQ	Material indiferenciado reciclado de baixa qualidade. Utilizado principalmente em operações de enchimento podendo também ser utilizado para reparação de algumas estradas de acesso local.
S10	Betão LQ	Betão reciclado de baixa qualidade. Utilizado em operações de enchimento, camadas estruturais de estradas, etc.
S11	Betão HQ	Betão reciclado de alta qualidade. Utilizado para produção de betão (agregado).
S12	Material “processado” em aterro	Quantidade de material que é “processada” em aterros.
MR1	Matéria residual 1	Matéria residual que pode ser depositada em aterro em condições normais.
MR2	Matéria residual 2	Matéria residual que resulta do processo de reciclagem sendo difícil a sua eliminação.

O esquema da figura 14 mostra todo o encadeamento dos processos, onde os materiais são representados por “S” e os processos por “k”. Os RCD, que são o S1 (betão) e S2 (material indiferenciado), podem ser tratados ou depositados em aterro. Caso sejam tratados, terão de passar primeiro pela triagem (k1) ou pela triagem incorporada (k2), resultando em matéria residual (MR1), materiais que serão vendidos (S5, S6, S7 e S8), além de S3 (betão triado) e S4 (indiferenciado triado), que seguem para o processo de reciclagem LQ (k3). A partir de k3 são originados novamente materiais para venda, matéria residual (somente MR2 neste caso), S9 (indiferenciado LQ) que será vendido e S10 (betão LQ). Em seguida, existem duas opções para S10, que são a venda ou a reciclagem HQ (k4). Por fim, o processo k4 produzirá MR2 e produtos que serão vendidos, incluindo S11 (betão HQ).

É importante destacar que caso não sejam depositados em aterro, os materiais S2 e S1 devem seguir a seguinte sequência: S2→S4→S9 e S1→S3→S10→S11, sendo que nesta última, S10 pode ou ser vendido ou processado (originando S11).

O aterro (k5) também é considerado como um processo, visto que existem materiais de entrada e de saída (este é sempre S12). Contudo, a sua análise é simplificada no modelo, visto que não são considerados os trabalhos que ocorrem neste processo. É de referir que são considerados dois tipos

de matéria residual pela diferença de tratamento que possuem, resultando em diferentes custos de deposição em aterro. A MR1 provém de um processamento mais leve, como uma triagem manual, possuindo um menor custo de deposição. Já a MR2 é originada nos processos de reciclagem, sendo uma matéria de difícil eliminação e sem aproveitamento. A MR1 é gerada apenas nos processos de triagem e a MR2 em todos os processos de reciclagem.

4.2.2 Matriz de transformação

A matriz de transformação (tabela 13) é utilizada para apresentar as proporções de saída de materiais em cada um dos processos considerados. Nas linhas aparecem os materiais de entrada juntamente com os processos aos quais podem ser submetidos, enquanto nas colunas são apresentados os materiais de saída destes mesmos processos.

Utilizando a primeira linha como exemplo (k1.S1), a matriz funciona da seguinte forma: ocorre a entrada do material S1 em k1, gerando nas devidas proporções os materiais S3, S5, S6, S7, S8 e MR1. Como foi explicado na secção anterior, os materiais S5, S6, S7 e S8 possuem valor de mercado e por isso serão vendidos, saindo do sistema. Já os materiais S3 e MR1 continuarão a ser processados e, como pode ser observado na matriz, S3 irá para o processo k3 (linha k3.S3) e MR1 irá para aterro (linha k5.MR1), sendo transformado completamente em S12. No caso de S3, após passar pelo processo k3, transforma-se nos materiais S5, S6, S7, S8, S10 e MR2, sendo que os quatro primeiros materiais serão vendidos, MR2 será destinada ao aterro, tal como foi MR1, e o material S10 pode ser vendido ou ser destinado ao processo k4 (linha k4.S10). As células que aparecem vazias indicam que o valor é zero, ou seja, não existe saída do material da coluna a partir do material e processo da linha (não existe saída de S4 em k1.S1, por exemplo).

Os valores da matriz foram calculados com base nos trabalhos desenvolvidos por Coelho (2012) e Andrade (2015), e serão explicados a seguir.

Tabela 13 – Matriz de transformação

		S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	MR1	MR2
Triagem	k1.S1	0,8427		0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0,1	0
	k1.S2		0,7427	0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0,2	0
Triagem Incorporada	k2.S1	0,8427		0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0,1	0
	k2.S2		0,6927	0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0,25	0
Reciclagem LQ	k3.S3			0,0332	0,0249	0,0024	0,0051		0,8344				0,1
	k3.S4			0,0332	0,0249	0,0024	0,0051	0,8344					0,1
Reciclagem HQ	k4.S10			0,0249	0,0332	0,0032	0,0068			0,8319			0,1
Aterro	k5.MR1										1		
	k5.MR2										1		
	k5.S1										1		
	k5.S2										1		

Segundo Coelho (2012), apenas 30% da massa de RCD que entra nas centrais de reciclagem é composta por agregados minerais, e 70% da massa restante equivale a RCD misturados. Deste modo, foi considerado no modelo que o fluxo inicial de RCD à entrada dos processos k1 e k2 seria de 70% de material indiferenciado (S2) e 30% de betão (S1).

Para calcular as proporções de saída dos materiais que podem ser vendidos (S5, S6, S7 e S8) em cada um dos processos, foi utilizada a tabela 14, com base no estudo realizado por Coelho & de Brito (2010), sendo apresentada a composição média percentual dos RCD.

Tabela 14 – Distribuição percentual da composição média dos RCD (Coelho & de Brito, 2010)

Materiais	%
Betão, tijolos e alvenaria	58,3
Metais (S5)	8,3
Madeira (S6)	8,3
Plástico (S7)	0,8
Papel e cartão (S8)	1,7
Outros resíduos	22,6

De acordo com Coelho (2012), foi considerado que nos processos iniciais (triagem e triagem incorporada) somente 30% dos metais e das madeiras são separados, de forma manual. Esta é a razão dos valores de saída de S5 e S6 nos processos k1 e k2 na matriz de transformação serem iguais a 2,49%, pois corresponde a 30% dos 8,3% apresentados na tabela 14. Também é considerado que nestes processos são separados 30% dos plásticos e dos papéis e cartões, e por isso tomam os valores de 0,24% e 0,51% respectivamente.

Relativamente às proporções de materiais enviados para aterro, os valores utilizados são baseados em Andrade (2015), que afirma que no processo de triagem (k1) sai 10% de material S1 para ser depositado como MR1 e o dobro no caso de S2. Na triagem incorporada (k2) o valor de S1 que sai como MR1 é idêntico, mas para o material indiferenciado aumenta 5% visto que não existe triturador neste processo. Como indicado na tabela 12 (secção 4.2.1), MR2 é a matéria residual oriunda dos processos de reciclagem, e assim só aparece nos processos k3 e k4.

No processo de reciclagem LQ só é permitida a entrada de material triado (S3 e S4), resultando em materiais reciclados de baixa qualidade (S9 e S10). Devido a este tipo de processo possuir extração com uso de magneto (ímã), é considerado que mais 40% dos metais são separados, e assim como na triagem, mais 30% das madeiras, plásticos, papéis e cartões.

Por fim, no processo de reciclagem HQ são extraídos os restantes materiais, o que equivale a 30% dos metais e 40% dos demais materiais. Todos os cálculos dos valores da matriz de transformação são apresentados no Anexo IV.

4.2.3 Matriz de custos de processamento

Nesta secção é abordado o cálculo da matriz de custos de processamento dos RCD, que é apresentada na tabela 15. Esta matriz mostra qual o custo para se processar cada tipo de material em cada tipo de processo, em euros por tonelada. Os processos são apresentados nas linhas da matriz, enquanto as colunas representam os materiais que entram em cada um dos processos.

Tabela 15 – Matriz de Custos de Processamento (€/ton)

	S1	S2	S3	S4	S10
k1	3,36	25,00			
k2	2,48	18,45			
k3			2,06	2,06	
k4					10,47

Para definir os valores da matriz foram feitos cálculos semelhantes aos realizados por Andrade (2015). Para isso, foram utilizados os custos anuais dos processos e uma aproximação da quantidade de material que entra nas centrais. Os custos anuais foram baseados em Coelho (2012), sendo considerados os custos dos equipamentos, de manutenção, da mão de obra e de energia, e que são apresentados no Anexo VI.

Uma vez que os custos de Coelho (2012) são representados em euros por ano, e para o modelo seria necessário um custo em euros por tonelada de RCD, foi feita uma estimativa da capacidade real das centrais da AML (em toneladas por ano), buscando saber a quantidade de material que entra nas centrais. De acordo com Andrade (2015), as centrais de reciclagem (k3 e k4) funcionam com aproximadamente 20% das suas capacidades autorizadas. Assim, foram recolhidos valores das capacidades autorizadas das empresas com base em seus alvarás, e após calculada a média destas capacidades, foi aplicada esta percentagem de modo a saber a capacidade real média destas empresas (Anexos V e VI).

No caso das centrais de triagem foi necessário calcular o custo separadamente para os materiais de entrada S1 e S2, visto que para os materiais indiferenciados (S2) o processo é mais dispendioso por necessitar de mais mão de obra. Deste modo, o custo de S1 foi calculado de modo semelhante aos das centrais de reciclagem, apenas com a alteração devido ao facto destas centrais operarem a cerca de 40% das suas capacidades autorizadas (Andrade, 2015). Já para S2, foi preciso inicialmente procurar a tabela de preços que as empresas cobram por esse tipo de material de acordo com as especificações deste trabalho (densidade superior a 0,6), sendo este valor de 50€/ton, em média. Contudo, este valor inclui o lucro que as empresas geram, não correspondendo ao real custo do processo. Assim, foi avaliado o lucro que as empresas geram a partir de S1 e posteriormente aplicado a S2, chegando a um custo de 25€/ton de S2 no processo k1. Para o processo k2 o custo é ligeiramente menor por ser uma triagem incorporada, sendo calculado de modo proporcional aos preços de S1.

4.3 Formulação Matemática do Modelo

Nesta secção é apresentada a formulação matemática do modelo, com base nos elementos descritos na secção anterior. São listados os conjuntos e índices, parâmetros, variáveis, função objetivo e restrições.

4.3.1 Conjuntos e Índices

- S – Conjunto dos estados dos materiais: $s_1, s_2, \dots, s_{12}, mr_1, mr_2$
 $s, s' \in S$
- $RCD(S)$ – Subconjunto dos RCD: s_1, s_2
 $RCD \subset S$
- $PI(S)$ – Subconjunto dos materiais intermédios: s_3, s_4, s_{10}
 $PI \subset S$
- $PV(S)$ – Subconjunto dos materiais reutilizáveis que podem ser vendidos: s_5, s_6, \dots, s_{11}
 $PV \subset S$
- $MR(S)$ – Subconjunto dos materiais residuais: mr_1, mr_2
 $MR \subset S$
- K – Conjunto dos processos considerados: k_0, k_1, \dots, k_5
 $k, k' \in K$
- KC – Conjunto das capacidades máximas consideradas para os processos K : kc_1, kc_2, \dots, kc_6
 $kc \in KC$
- I – Conjunto de nós da rede: i_1, i_2, \dots, i_N (no modelo $N=211$ visto que são consideradas 211 freguesias)
 $i, j \in I$
- T – Conjunto dos períodos (meses): t_1, t_2, \dots, t_{12}
 $t \in T$
- $Iks_{k,s}$ – Conjunto de materiais s que entram no processo k
- $Oks_{k,s}$ – Conjunto de materiais s que são produzidos pelo processo k

O processo k_0 do conjunto K é um processo hipotético, que representa a produção de RCD.

Os dois últimos conjuntos ($Iks_{k,s}$ e $Oks_{k,s}$) têm o objetivo de definir os materiais s que entram e saem dos processos k , respectivamente. Estas correspondências podem ser consultadas no Anexo VII.

4.3.2 Parâmetros

- $Xrec$ – Escalar que define a percentagem mínima de RCD que deve ser tratado
- cda_s – Custo de deposição em aterro do material s (€/ton)
 $\forall s \in RCD \cup MR$
- e_s – Valor de venda do material s (€/ton)
 $\forall s \in PV$

- u_s – Procura do material s (ton/mês)
 $\forall s \in PV$
- $b_{i,j}$ – Custo de transporte de um material do nó i para o nó j (€/ton)
 $\forall (i,j) \in I$
- $h_{i,s}$ – Quantidade de material s produzido no local i anualmente (ton/ano)
 $\forall s \in RCD; i \in I$
- $Percent_t$ – Sazonalidade da produção de RCD (Definida como a percentagem de RCD que é produzida em cada período t)
- $ht_{i,s,t}$ – Quantidade de material s produzido no local i no período t , com base na sazonalidade definida pelo outro parâmetro $Percent_t$ (ton/mês)
 $\forall s \in RCD; i \in I; t \in T$
- $v_{k,s,s'}$ – Proporção de material s' produzido a partir do material s no processo k
 $\forall k \in K; (s,s') \in S$
- $yp_{i,k}$ – Processos k pré-existentes no nó i (matriz binária)
 $\forall k \in K; i \in I$
- $cp_{k,s}$ – Custo de processamento do material s no processo k (€/ton.ano)
 $\forall k \neq k0; s \notin RCD$
- $kup_{k,i}$ – Capacidade pré-existente de processamento dos processos k no nó i (ton/mês)
 $\forall k \in K; i \in I$
- $kkc_{kc,k}$ – Capacidades kc disponíveis para instalação de novos processos k (ton/mês)
 $\forall kc \in KC; k \neq (k0, k5)$
- $ikc_{k,kc}$ – Custo de instalação de uma capacidade kc para o processo k (€)
 $\forall kc \in KC; k \neq (k0, k5)$
- $Lig_{k,k'}$ – Determina os possíveis processos k' que vem em seguida do processo k (matriz binária)
 $\forall k \neq k5; k' \neq k0$

4.3.3 Variáveis

No modelo desenvolvido foram utilizadas variáveis contínuas e binárias, que são listadas a seguir:

$Custo$ – Custo global da rede de reciclagem (€)

$CustoAterro_t$ – Custo de deposição em aterro dos RCD, incluindo os custos de transporte, no período t (€)

$CustoProcesso_t$ – Custo dos processos da rede de reciclagem, desde os custos de transporte dos RCD para as centrais de reciclagem até os custos de deposição em aterro dos materiais residuais, para cada período t (€/mês). Esta variável é calculada por meio da soma de quatro outras variáveis, que são apresentadas a seguir:

- $Proc1_t$ – Custo de processamento dos materiais nas centrais de triagem e reciclagem, incluindo os custos de transporte, no período t (€)
- $Proc2_t$ – Custo de deposição em aterro dos materiais residuais, incluindo os custos de transporte, no período t (€)
- $Proc3_t$ – Receita obtida com a venda dos produtos reciclados no período t (€)
- $Proc4_t$ – Custo de instalação de uma nova central no período t (€)

$Q_{s,i,j,k,k',t}$ – Quantidade de material s proveniente do processo k no nó i e que vai para o processo k' no nó j no período t (ton)

Q_{rec} – Quantidade de RCD que deve ser tratada (ton/ano)

Q_{ate} – Quantidade de RCD que pode ser depositada em aterro (ton/ano)

$Hdep_{i,s,t}$ – Quantidade de RCD, em toneladas, disponível para tratamento ou deposição em aterro no período t, sendo a soma da quantidade de RCD produzida neste período com a quantidade de RCD que não foi tratada ou depositada em aterro nos períodos anteriores.

$X_{s,i,k,t}$ – Quantidade de material s vendido no nó i proveniente do processo k no período t (ton)

$KKI_{k,i,t}$ – Capacidade instalada do processo k no nó i a partir do período t, sendo consideradas tanto as capacidades pré-existentes quanto as novas (ton/mês)

$IKI_{k,i,t}$ – Custo de investimento relativo à instalação de um processo k no nó i no período t (€)

$Y_{k,i,t}$ – Variável binária que define se existe o processo k no nó i no período t

- $Y_{k,i,t} = 1$ caso exista o processo k em i no período t
- $Y_{k,i,t} = 0$ caso contrário

$YC_{k,kc,i,t}$ – Variável binária que seleciona a capacidade máxima kc do processo k no nó i no período t

- $YC_{k,kc,i,t} = 1$ se o processo k em i no período t tiver uma capacidade máxima kc
- $YC_{k,kc,i,t} = 0$ caso contrário

4.3.4 Função objetivo

A função objetivo (Equação [7]) consiste no agrupamento de todos os custos e receitas da GRCD.

Custo do processo

O custo do processo é composto por quatro termos, correspondendo a três custos e a uma receita (a receita ($Proc3_t$) recebe um sinal negativo na equação):

$$CustoProcesso_t = Proc1_t + Proc2_t - Proc3_t + Proc4_t \quad \forall t \in T \quad [1]$$

As expressões dos quatro termos referidos são as seguintes:

1. Custo operacional de todos os processos, incluindo os custos de transporte:

$$Proc1_t = \sum_{k' \neq (k0, k5)} \sum_{s \in iks_{k',s}} \sum_{k \in oks_{k,s}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} Lig_{k,k'} * (b_{i,j} + cp_{k',s}) * Q_{s,i,j,k,k',t} \quad \forall t \in T \quad [2]$$

2. Custo de deposição em aterro das MR, incluindo os custos de transporte:

$$Proc2_t = \sum_{s \in MR} \sum_{k \in oks_{k,s}} \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} (cda_s + b_{i,j}) * Q_{s,i,j,k,k',t} \quad \forall t \in T; k' = k5 \quad [3]$$

3. Receita com a venda dos materiais processados:

$$Proc3_t = \sum_{k \neq (k0, k5)} \sum_{i \in I} \sum_{s \in (PV \cap oks_{k,s})} X_{s,i,k,t} * e_s \quad \forall t \in T \quad [4]$$

4. Custo de investimento para a instalação de novos processos:

$$Proc4_t = \sum_{k \neq (k0, k5)} \sum_{i \in I} IKI_{k,i,t} \quad \forall t \in T \quad [5]$$

Custo do aterro

O custo do aterro é composto por apenas um termo, que corresponde ao custo de deposição direta de RCD em aterro, considerando o custo de transporte:

$$CustoAterro_t = \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} \sum_{s \in RCD} (cda_s + b_{i,j}) * Q_{s,i,j,k,k',t} \quad \forall t \in T; k = k0; k' = k5 \quad [6]$$

Custo total

A função *Custo* é a função objetivo do problema, a minimizar, e resulta da soma das equações (1) e (6):

$$Custo = \sum_{t \in T} CustoProcesso_t + \sum_{t \in T} CustoAterro_t \quad \forall t \in T \quad [7]$$

4.3.5 Restrições

O modelo compreende 21 restrições, descritas em seguida:

- Todos os processos pré-existentes no nó *i* devem continuar a funcionar no primeiro período:

$$Y_{k,i,t} \geq yp_{i,k} \quad \forall k \neq (k0, k5); i \in I; t = t1 \quad [8]$$

- Todos os processos pré-existentes ou novos no nó *i* devem ser mantidos em funcionamento nos períodos subsequentes:

$$Y_{k,i,t} \geq Y_{k,i,t-1} \quad \forall k \neq (k0, k5); i \in I; t \neq t1 \quad [9]$$

- Apenas uma das capacidades possíveis de KC pode ser selecionada ao ser instalado um novo processo k no nó i:

$$\sum_{kc \in KC} YC_{k,kc,i,t} = Y_{k,i,t} \quad \forall k \neq (k0, k5); i \in I; t \in T \quad \text{se } yp_{i,k} = 0 \quad [10]$$

- Devem ser mantidas as capacidades dos processos selecionadas em períodos anteriores:

$$YC_{k,kc,i,t} \geq YC_{k,kc,i,t-1} \quad \forall k \neq (k0, k5); i \in I; kc \in KC; t \neq t1 \quad \text{se } yp_{i,k} = 0 \quad [11]$$

- Não é permitida a abertura de novos aterros (hipótese assumida):

$$Y_{k,i,t} = yp_{i,k} \quad \forall i \in I; t \in T; k = k5 \quad [12]$$

- As próximas três equações são usadas na atribuição do valor da variável $KKI_{k,i,t}$, que define a capacidade dos processos no nó i, em cada período t:

- Caso não exista nenhum processo k pré-instalado ($yp_{i,k} = 0$), $KKI_{k,i,t}$ assume o valor $kkc_{kc,k}$ se a variável $YC_{k,kc,i,t}$ for igual a 1, e assume o valor zero caso contrário:

$$KKI_{k,i,t} = \sum_{kc \in KC} kkc_{kc,k} * YC_{k,kc,i,t} \quad \forall k \neq (k0, k5); i \in I; t \in T \quad \text{se } yp_{i,k} = 0 \quad [13]$$

- Caso já exista um processo k no nó i ($yp_{i,k} = 1$), $KKI_{k,i,t}$ assume o valor da capacidade existente:

$$KKI_{k,i,t} = kup_{k,i} \quad \forall k \neq (k0, k5); i \in I; t \in T \quad \text{se } yp_{i,k} = 1 \quad [14]$$

- Não é permitida a abertura de novos aterros, pelo que é atribuído o valor nulo à variável $KKI_{k,i,t}$ nos nós em que não existe k5, e o valor de $kup_{k,i}$ nos nós em que existe este processo:

$$KKI_{k,i,t} = kup_{k,i} * yp_{i,k} \quad \forall i \in I; t \in T; k = k5 \quad [15]$$

- As duas equações a seguir atribuem valor à variável $IKI_{k,i,t}$ relativa ao investimento para instalação de um novo processo k no nó i:

- Em t1, caso não exista um processo k pré-instalado ($yp_{i,k} = 0$), $IKI_{k,i,t}$ assume o valor $ikc_{k,kc}$ se $YC_{k,kc,i,t} = 1$:

$$IKI_{k,i,t} = \sum_{kc \in KC} ikc_{k,kc} * YC_{k,kc,i,t} \quad \forall i \in I; k \neq (k0, k5); t = t1 \quad \text{se } yp_{i,k} = 0 \quad [16]$$

- A partir de t2, caso não exista um processo k pré-instalado ($yp_{i,k} = 0$), assume o valor $ikc_{k,kc}$ selecionado por $YC_{k,kc,i,t} = 1$. Esta segunda equação tem a finalidade de não considerar o custo de investimento em duplicado, existindo assim a diferença entre as variáveis $YC_{k,kc,i,t}$ e $YC_{k,kc,i,t-1}$:

$$IKI_{k,i,t} = \sum_{kc \in KC} ikc_{k,kc} * (YC_{k,kc,i,t} - YC_{k,kc,i,t-1}) \quad [17]$$

$$\forall i \in I; k \neq (k0, k5); t \neq t1 \quad se \ yp_{i,k} = 0$$

- As vendas são limitadas pela procura existente:

$$\sum_{k \neq (k0, k5)} \sum_{i \in I} X_{s,i,k,t} \leq u_s \quad \forall s \in PV; t \in T \quad [18]$$

- A quantidade total de materiais processados é limitada pela capacidade do processo k instalada no nó j:

$$\sum_{s \in iks_{k',s}} \sum_{i \in I} \sum_{k \in oks_{k,s}} (Lig_{k,k'} * Q_{s,i,j,k,k',t}) \leq KKI_{k',j,t} \quad \forall k' \neq k0; j \in I; t \in T \quad [19]$$

- As restrições [20] a [22] derivam da imposição de uma quantidade mínima de RCD a tratar, de acordo com o valor de $Xrec$. Por exemplo, caso se deseje seguir o decreto europeu de tratar 70% dos RCD produzidos, é atribuído a $Xrec$ um valor de 0,7. Nesse caso, a primeira inequação estabelece que a quantidade de RCD tratada é igual ou superior a 70% do total, a segunda limita a quantidade de RCD depositada em aterro ao valor máximo de 30% do total e, por fim, a terceira equação soma as duas quantidades anteriores de modo a que todos os RCD sejam ou tratados ou depositados em aterro.

$$Qrec \geq Xrec * \sum_{s \in RCD} \sum_{i \in I} h_{i,s} \quad [20]$$

$$Qate \leq (1 - Xrec) * \sum_{s \in RCD} \sum_{i \in I} h_{i,s} \quad [21]$$

$$Qrec + Qate = \sum_{s \in RCD} \sum_{i \in I} h_{i,s} \quad [22]$$

- O valor de $Qrec$ é igualado ao fluxo de materiais $Q_{s,i,j,k,k',t}$ que vai para reciclagem:

$$Qrec = \sum_{i \in I} \sum_{s \in RCD} \sum_{j \in J} \sum_{k' \in (k2, k3)} \sum_{t \in T} Q_{s,i,j,k,k',t} \quad para \ k = k0 \quad [23]$$

- O valor de $Qate$ é igualado ao fluxo de materiais $Q_{s,i,j,k,k',t}$ que vai para aterro:

$$Qate = \sum_{i \in I} \sum_{s \in RCD} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Q_{s,i,j,k,k',t} \quad para \ k = k0; k' = k5 \quad [24]$$

- Definição da quantidade de RCD disponível ($Hdep_{i,s,t}$) no período t1 para tratamento ou deposição em aterro:

$$Hdep_{i,s,t} = ht_{i,s,t} \quad \forall i \in I; s \in RCD; t = t1 \quad [25]$$

- Definição da quantidade de RCD disponível ($Hdep_{i,s,t}$) a partir de t_2 para tratamento ou deposição em aterro:

$$Hdep_{i,s,t} = ht_{i,s,t} + Hdep_{i,s,t-1} - \sum_{j \in I} \sum_{k' \in (k1,k2,k5)} Q_{s,i,j,k,k',t-1} \quad [26]$$

$\forall i \in I; s \in RCD; t \neq t_1; k = k_0$

- Balanço de massa dos RCD no nó i para o período t (para a inicialização do fluxo de materiais – processo k_0):

$$\sum_{k' \in (k1,k2,k5)} \sum_{j \in I} Q_{s,i,j,k,k',t} \leq Hdep_{i,s,t} \quad \forall s \in RCD; k = k_0; i \in I; t \in T \quad [27]$$

- Balanço de massa global para cada nó i no período t :

$$\sum_{s \in oks_{k',s}} \left(v_{k',s,s'} * \sum_{k \in oks_{k,s}} \sum_{i \in I} Lig_{k,k'} * Q_{s,i,j,k,k',t} \right) = X_{s',j,k',t} + \sum_{k \in oks_{k,s'}} \sum_{i \in I} Q_{s',j,i,k',k,t} \quad [28]$$

$\forall j \in I; k' \neq k_0; s' \in oks_{k',s'}; t \in T$

A equação [28] pode ser considerada uma das mais importantes do modelo, se não a mais importante, visto que assegura o balanço de massa de todo o sistema. Devido à sua complexidade, será feita uma explicação detalhada da mesma, seguida de um exemplo:

O material s , que vem do processo k no nó i , é transformado pelo processo k' no nó j , originando nas proporções de $v_{k',s,s'}$ os materiais de saída X e Q . Um balanço hipotético do RCD S1, no nó j no período t corresponde a (exemplo considerando que o RCD não será depositado diretamente em aterro):

$$v_{k1,s1,s'} * Q_{s1,i,j,k0,k1,t} = X_{s',j,k1,t} + Q_{s3,j,i,k1,k0,t} + Q_{MR1,j,i,k1,k0,t} \quad [29]$$

- O material $s=S1$ entra no processo $k'=k1$ do nó j , vindo do processo $k=k_0$ do nó i . De acordo com o parâmetro $Lig_{k,k'}$, o k' pode ser $k1$ ou $k2$, e no exemplo é considerado que o material vai para a triagem ($k1$).
- De acordo com as proporções da matriz de transformação (tabela 13), saem os materiais $X_{s',j,k1,t}$ ($s'=S5,S6,S7,S8$) que são vendidos no nó j , além dos materiais que serão processados posteriormente, que no caso são $S3$ para o processo $k3$ e $MR1$ para $k5$.

Na figura 15 é apresentada uma ilustração deste exemplo, que espelha o que acontece na equação [29]. Os valores que aparecem a vermelho são as percentagens de materiais que saem do processo $k1$, que são apresentadas na matriz de transformação.

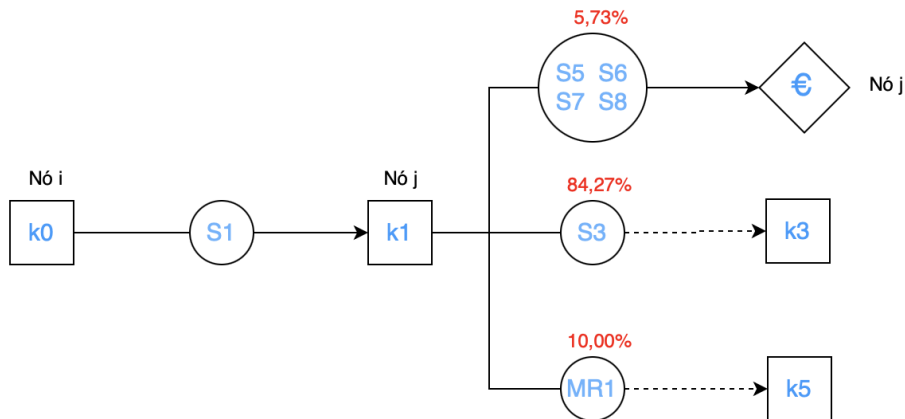


Figura 15 – Fluxograma da equação do balanço de massa

4.3.6 Pressupostos do Modelo

A variável $Y_{k,i,t}$ define que processo existe no nó i, e como esta é uma variável binária, só pode existir um processo de cada tipo num dado nó da rede. Outro pressuposto do modelo é que, caso já exista um processo k no nó i com uma determinada capacidade, esta não pode ser alterada, ou seja, caso seja necessária uma capacidade maior para este mesmo processo, é preciso investir em uma nova central em outro nó.

Caso existam os processos k2, k3 e k4 no mesmo nó, a distância entre eles não precisa ser considerada, pois se encontram na mesma central. Contudo, caso exista uma central de triagem (k1) e outra de reciclagem no mesmo nó, isto quer dizer que são instalações diferentes, mas a distância não é contabilizada, pois não são consideradas as distâncias intra nó.

Outro pressuposto é relativo à capacidade de armazenamento. De acordo com o modelo desenvolvido, resíduos produzidos em um período podem ser reciclados ou depositados em aterro nos períodos seguintes, sem que seja estipulada uma capacidade de armazenamento para estes. Por fim, por motivos de simplificação do modelo, considera-se que a capacidade dos aterros (processo k5) é ilimitada, além de não ser possível a abertura de novos aterros.

5. Aplicação do Modelo: resultados e discussão

Neste capítulo é feita a análise dos resultados obtidos com a aplicação do modelo desenvolvido. Primeiramente são apresentados os dados de *input*, bem como a interface e o solver que foram utilizados na resolução do modelo. Em seguida, este é aplicado a um exemplo reduzido para efeitos de validação, no qual são consideradas apenas 10 freguesias da AML. Por fim, o modelo é aplicado às 211 freguesias da AML e alguns cenários são criados e analisados.

5.1 Dados de *Input*

Nesta secção é abordado o tratamento dos dados recolhidos, o modo como foram adequados ao modelo e os pressupostos considerados face ao défice de informação. É importante ressaltar que os dados relativos à produção de RCD foram estimados por Bernardo (2013) que considerou a divisão da AML em 211 freguesias (pré-agregação de 2013), freguesias estas que são consideradas neste trabalho. Outra informação relevante é que devido à pandemia do COVID-19 o contacto com as empresas ficou dificultado, sendo necessário utilizar diversos dados de Andrade (2015) de modo a conseguir os melhores valores possíveis para o modelo.

Nós da rede (i)

A Área Metropolitana de Lisboa reúne 18 municípios que são divididos em 211 freguesias. Na figura 16 é apresentado o mapa da AML com as fronteiras das freguesias e dos municípios. No modelo foram considerados 211 nós da rede, cada um representando uma freguesia, e que estão listados no Anexo VIII.



Figura 16 – Mapa da AML (Andrade, 2015)

Distância e custo de transporte

Andrade (2015) utilizou uma rede de estradas disponibilizada pela área de Sistemas de Informação Geográfica do IST/DECivil, e por meio do software ArcGis obteve uma matriz com as distâncias entre todos os pares de nós dos 211 nós em estudo. As distâncias foram calculadas entre os centróides de

cada freguesia utilizando as estradas com menor custo. Na figura 17 é apresentado um mapa da AML com as estradas e centróides considerados para o cálculo das distâncias.



Figura 17 – Mapa da AML com centróides das freguesias e estradas consideradas (Andrade, 2015)

De acordo com Coelho (2012), o custo de transporte em estradas que não possuem portagem é de 0,34€/km.ton. Além disso, um estudo da Associação Portuguesa das Sociedades Concessionárias de Auto-Estradas ou Pontes com Portagens indica que, dentre todos os custos de uma viagem de autoestrada, as portagens representam 35% do valor total. Deste modo, Andrade (2015) utilizou o ArcGis para vincular um custo de 0,34€/km.ton para estradas que não possuem portagens, e um valor de $0,34 \times 1,35 = 0,46$ €/km.ton para estradas portajadas.

Materiais

Os materiais que foram considerados no modelo são os apontados na secção 4.2.1 (tabela 12) e na formulação matemática (secção 4.3.1), e, para evitar repetição, não são descritos novamente.

Capacidades e processos pré-existentes na AML

Na tabela 16 são apresentadas as empresas que foram consideradas, juntamente com os processos que cada uma possui, a freguesia onde se localizam e a capacidade autorizada (em toneladas por ano, sendo que para o modelo estes valores foram divididos por 12 de modo que fiquem em toneladas por mês). Como foi citado na secção 4.2.3, estas capacidades foram retiradas dos alvarás das empresas, e são consideradas apenas as empresas com capacidades mais relevantes.

É importante frisar que no modelo foi considerado não existir o mesmo processo duas ou mais vezes no mesmo nó. Assim, as empresas que são da mesma freguesia e possuem os mesmos processos tiveram suas capacidades somadas, como foram os casos da SGR com a Transucatas (k2 e k3 no nó i19) e da Ambitrena com a Quima (k1 no nó i2), que aparecem a vermelho na tabela. Deste modo, o modelo possui 11 processos k1 pré-existentes, além de 6 processos k2 e 6 processos k3.

Tabela 16 – Processos pré-existentes na AML considerados

Empresas	Processos	Freguesia	Nó	Capacidade Autorizada (ton/ano)
Bucelbritas	Reciclagem (k2+k3)	Bucelas	i191	230.000
Citri	Reciclagem (k2+k3)	Sado	i2	150.000
Renascimento	Reciclagem (k2+k3)	Sto. Antão do Tojal	i176	200.000
Sanestradas	Reciclagem (k2+k3)	S. Domingos de Rana	i117	139.000
Soarvamil	Reciclagem (k2+k3)	Corroios	i24	134.200
SGR	Reciclagem (k2+k3)	Paio Pires	i19	100.000
Transucatas	Reciclagem (k2+k3)	Paio Pires	i19	196.000
Ambides	Triagem (k1)	Terrugem	i181	40.000
Ambitrena	Triagem (k1)	Sado	i2	15.000
Quima	Triagem (k1)	Sado	i2	313.995
Asocorsul	Triagem (k1)	Sto. Antão do Tojal	i176	15.000
BGR	Triagem (k1)	S. João da Talha	i168	100.000
Carmona	Triagem (k1)	Barreiro	i33	40.000
Correia Correia	Triagem (k1)	Venda do Pinheiro	i196	70.080
Gândara	Triagem (k1)	São Marcos	i128	39.300
Jorge F. de Almeida	Triagem (k1)	Pêro Pinheiro	i173	64.800
Jorge M. e Camacho	Triagem (k1)	Palmela	i14	34.500
José M. Ferreira	Triagem (k1)	S. Domingos de Rana	i117	32.110
Resotrans	Triagem (k1)	Frielas	i166	35.000

Custo de investimento de novos processos

Na tabela 17 são apresentados os custos de investimento para instalação de novas centrais de reciclagem de acordo com as capacidades consideradas no modelo para estas centrais. Esses valores foram calculados por Andrade (2015), que por meio de contacto com a empresa SGR foi informado que o custo de investimento foi de aproximadamente 1.500.000€, sendo que a empresa possui uma capacidade de 100.000 toneladas por ano. Hiete et al. (2011) afirma que a instauração do dobro da capacidade em uma central possui um custo de cerca de 400.000€, e a partir destes dados Andrade (2015) fez uma extrapolação linear e chegou aos valores abaixo.

Tabela 17 – Custo de investimento de uma nova central

Capacidade (ton/ano)	Capacidade (ton/mês)	Custo (€)
50.000	4.167	1.300.000
100.000	8.333	1.500.000
150.000	12.500	1.700.000
200.000	16.667	1.900.000
250.000	20.833	2.100.000
300.000	25.000	2.300.000

Contudo, é necessário para o modelo um custo de investimento para cada um dos processos. Considerando que a capacidade dos processos está diretamente ligada à capacidade de seus equipamentos, Andrade (2015) calculou a representatividade dos equipamentos dentro dos processos de acordo com os custos, chegando a um factor. Para este cálculo, foi dividido o custo dos equipamentos de cada processo pelo custo dos equipamentos no processo completo de reciclagem. Em seguida, multiplica-se este factor pelo custo de investimento de uma central, chegando ao custo de investimento em cada um dos processos, como é apresentado na tabela 18.

É interessante observar que uma central de reciclagem possui obrigatoriamente os processos de triagem incorporada e reciclagem LQ (k2 e k3), e por isso a soma de seus fatores deve ser igual a 1. O processo de reciclagem HQ possui os equipamentos mais caros, e por isso possui um factor maior que os outros processos. Os processos k1 e k2 possuem o mesmo factor, visto que são dois processos de triagem.

Tabela 18 – Custo de investimento de um novo processo consoante sua capacidade

Processo	Factor	Capacidade (ton/ano)					
		50.000	100.000	150.000	200.000	250.000	300.000
k1	0,59	767.000€	885.000€	1.003.000€	1.121.000€	1.239.000€	1.357.000€
k2	0,59	767.000€	885.000€	1.003.000€	1.121.000€	1.239.000€	1.357.000€
k3	0,41	533.000€	615.000€	697.000€	779.000€	861.000€	943.000€
k4	0,68	884.000€	1.020.000€	1.156.000€	1.292.000€	1.428.000€	1.564.000€

Produção de RCD por freguesia

O parâmetro $h_{i,s}$ que representa a produção de RCD para cada freguesia, foi calculada com base em dois trabalhos. Bernardo (2013) estimou a produção global de RCD para as 211 freguesias consideradas, e Coelho (2012) calculou as proporções de S1 e S2 (tabela 19) como já foi referido na secção 4.2.3. Assim, foi possível estimar a produção de cada resíduo nos 221 nós, conforme é apresentado no Anexo IX.

Tabela 19 – Proporção dos RCD

Materiais	
S1 – Betão	30%
S2 – Material indiferenciado	70%

Produção de RCD sazonal

A produção de RCD para cada período t é calculada com base na multiplicação dos parâmetros $h_{i,s}$ e $Percent_t$, resultando nos valores de $ht_{i,s,t}$. A produção global considerada no modelo é de 597,6 kton, sendo 179,3 kton de S1 e 418,3 kton de S2. Com isso, e juntamente com a sazonalidade apresentada na tabela 11 da secção 4.2, a produção dos RCD para cada período t (mês) é ilustrada na figura 17.

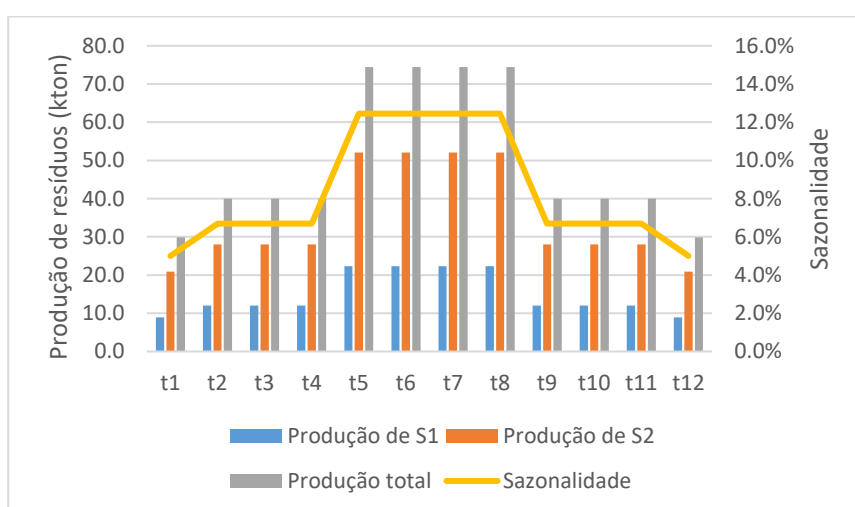


Figura 18 – Sazonalidade e produção de RCD para cada período t

Custo de deposição em aterro

Após os processos de reciclagem são gerados materiais residuais, sendo que estes materiais são destinados aos aterros. Além disso, existe a opção de depositar S1 e S2, sendo que esta é uma escolha da gestão. Em ambos os casos esse depósito acarreta custos que são apresentados na tabela 20.

Tabela 20 – Custo de deposição em aterro

Materiais	Custo (€/ton)	Observações
S1	8,80	Lei nº 82-D/2014
S2	15,00	Tabela de preços Soarvamil
MR1	50,00	Tabela de preços Soarvamil (densidade mais recorrente $0,8 < d < 1,0$)
MR2	114,00	Valor considerado por Coelho (2012), Correia (2013) e Andrade (2015) para materiais rejeitados

Como foi citado anteriormente, é considerado no modelo que não é permitida a abertura de novos aterros, sendo apresentados na tabela 21 os aterros considerados por Andrade (2015) e que são licenciados na AML para deposição de RCD.

Tabela 21 – Aterros licenciados na AML

Aterro de RCD	Freguesia	Nó
Citri	Sado	i2
Soarvamil	Corroios	i24

Procura de produtos reutilizáveis (PV)

A tabela 22 apresenta os valores em toneladas por ano de uma potencial procura de materiais reciclados na região de Lisboa, segundo Coelho (2012). Por conta da dificuldade de encontrar dados, Andrade (2015) considerou que estes dados correspondem à AML, e assim é feito neste trabalho.

Tabela 22 – Procura de materiais reciclados na região de Lisboa (Coelho, 2012)

Procura de materiais reciclados em Lisboa (ton/ano)	
Agregados para betão	1.638.709
Bases + sub-bases para estradas	82.946
Enchimentos genéricos	439.161

Foi necessário adaptar estes valores para o modelo, por conta das utilidades dos materiais considerados. Assim, na tabela 23 são apresentados os valores da procura dos materiais que resultam dos processos de reciclagem e triagem. Essas procuras representam a quantidade máxima anual de materiais que podem ser vendidos. Por conta do valor comercial e serem utilizados em diversas áreas além da construção e demolição, foi assumida uma procura ilimitada para os materiais S5, S6, S7 e S8. S9 e S11 assumem estes valores pois o material indiferenciado LQ é utilizado como enchimento genérico, enquanto o betão HQ como agregado de betão. Por fim, o betão LQ pode ter mais de uma funcionalidade, servindo como bases e sub-bases de estradas ou enchimentos genéricos, e por isso foi feita a soma das procuras da tabela 22.

Tabela 23 – Procura para cada tipo de material vendido do modelo

Materiais	Procura na AML (ton/ano)
S5 – Misturas de metais	Procura ilimitada
S6 – Madeira	Procura ilimitada
S7 – Plástico	Procura ilimitada
S8 – papel e cartão	Procura ilimitada
S9 – Indiferenciado LQ	439.161
S10 – Betão LQ	522.107
S11 – Betão HQ	1.638.709

Valor de venda dos materiais

Na tabela 24 são apresentados os valores de vendas de cada um dos materiais que saem dos processos e não são destinados aos aterros.

Tabela 24 – Valor de venda dos materiais reciclados

Materiais	Valor (€/ton)	Observação
S5 – Misturas de metais	105,00	Valor apontado por Coelho (2012)
S6 – Madeira	22,50	Valor apontado por Coelho (2012)
S7 – Plástico	40,00	Valor apontado por Coelho (2012)
S8 – papel e cartão	25,00	Valor apontado por Coelho (2012)
S9 – Indiferenciado LQ	1,00	Valor apontado por Bernardo (2013)
S10 – Betão LQ	1,65	Valor de Coelho (2012) que corresponde a 30% do valor de mercado de agregados pétreos.
S11 – betão HQ	2,75	Valor de Coelho (2012) que corresponde a 50% do valor de mercado de agregados pétreos.

5.2 Interface e Solver utilizado

Foi utilizado um computador com processador Intel® Core™ i7 CPU, 3610MQ, com 2,3GHz e 16 GB de RAM, para implementar um modelo de programação linear inteira mista (MILP) em GAMS (*Generic Algebraic Modeling System*). Para a resolução do problema utilizou-se a versão GAMS 33.2.0 e o solver CPLEX 12.10.0.0. De modo a atingir a solução ótima, o solver CPLEX determina, em um primeiro momento, uma solução relaxada (com todas as variáveis contínuas e positivas) e o respectivo valor da função objetivo. Em seguida, o solver recorre ao algoritmo “branch and bound” para aproximar o valor da função objetivo ao da solução relaxada (Almeida, 2010).

5.3 Modelo Reduzido

Nessa secção o modelo é aplicado e analisado numa dimensão reduzida, simplificando a interpretação dos resultados e a validação. Inicialmente são apresentados os dados de *input* deste modelo reduzido, visto que alguns parâmetros precisam ter seus valores alterados. Em seguida são analisados os resultados de alguns cenários e, por fim, é feita uma breve conclusão com base nos resultados obtidos nestes cenários.

5.3.1 Dados de *Input* do Modelo Reduzido

Os dados de *input* que são utilizados no modelo reduzido são os mesmos descritos na secção 5.1, com exceção do número de freguesias (nós) que são consideradas e das capacidades dos processos pré-existentes. Os nós considerados são os mesmos utilizados por Andrade (2015), de modo que seja possível realizar um cenário de comparação entre os dois modelos.

Nós da rede

Foram considerados por Andrade (2015) 10 freguesias adjacentes (situadas na Margem Sul do rio Tejo), de forma a que os custos de transporte não distorcessem os resultados do modelo. Além da adjacência, outro critério considerado foi a existência de no mínimo um aterro e cada um dos principais processos (nota-se que não existe o processo k4 na AML). Na tabela 25 são apresentados os nós considerados, juntamente com os processos pré-existentes e a produção de RCD para cada uma das freguesias.

Tabela 25 – Freguesias do modelo reduzido e seus respectivos processos e produção de RCD (Adaptado de Andrade (2015))

Freguesia	Quinta do Conde	Fernão Ferro	Coina	Palhais	Arrentela
Nó	i11	i12	i13	i15	i17
Processos	—	—	—	—	—
Produção RCD (ton)	221	176	2.087	85	1.507
Freguesia	Aldeia de Paio Pires	Seixal	Corroios	Amora	Barreiro
Nó	i19	i23	i24	i25	i33
Processos	k2 e k3	—	k2, k3 e k5	—	k1
Produção RCD (ton)	548	548	2.359	2.041	3.920

Capacidade dos processos pré-existentes

Como o número de freguesias do modelo reduzido diminuiu, conseqüentemente a produção de RCD global também foi encurtada, sendo assim necessário adequar a capacidade das centrais de modo a não distorcer os resultados e conseguir uma melhor interpretação dos mesmos. Na tabela 26 são apresentados os valores das capacidades autorizadas e consideradas para o modelo reduzido.

Tabela 26 – Capacidades consideradas no modelo reduzido

Nó	Processos	Capacidade Autorizada (ton/ano)	Capacidade Considerada (ton/ano)	Capacidade Considerada (ton/mês)
i33	k1	40.000	400	33,33
i19	k2 e k3	296.000	2.960	246,67
i24	k2 e k3	134.200	1.342	111,83
i24	k5	Capacidade dos aterros é ilimitada		

5.3.2 Resultados

Nesta secção são analisados os resultados obtidos nos três cenários do modelo de dimensão reduzida, sendo o primeiro o cenário base. Em seguida é construído um cenário comparativo, onde o modelo atual é comparado com o desenvolvido por Andrade (2015). Por fim, é criado um cenário livre, variando a quantidade de RCD que deve ser reciclado obrigatoriamente.

5.3.2.1 Cenário Base

No cenário base o modelo é corrido no software GAMS utilizando os dados de *input* descritos nas secções 5.1 e 5.3.1. Além disso, foi atribuído ao parâmetro *Xrec* o valor 0,7, definindo que a percentagem mínima de RCD reciclados seja de 70%, conforme o decreto da UE. As principais estatísticas referentes a este cenário são apresentadas na tabela 27.

Tabela 27 – Estatísticas do modelo reduzido no cenário base

Nº de equações	Nº de variáveis	Nº de variáveis discretas	Nº de iterações	Tempo para gerar dados (s)	Tempo de execução (s)	Margem de optimalidade (%)
9.708	32.127	3.240	2.369.962	0,796	1.057,33	0,0

Existem neste modelo reduzido 9.708 equações e 32.127 variáveis, das quais 3.240 são variáveis discretas. Foram necessárias 2.369.962 iterações e 17 minutos e 37,33 segundos para chegar a uma solução com desvio relativo de 0,0%, ou seja, foi atingida a optimalidade. Na tabela 28 são indicados os principais resultados para este cenário.

Tabela 28 – Dados de *output* do cenário base

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	9.444,4
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	4.047,6
Percentagem de RCD reciclados	70,0
Percentagem de RCD depositados em aterro	30,0
Capacidade utilizada média (%)	47,2
Custo de processamento (m€)	1.546,76
Custo de deposição direta em aterro (k€)	64,64
Custo total (k€)	1.611,40

Foram reciclados exatamente 70% dos RCD produzidos, sendo esta a percentagem mínima definida. Este resultado era esperado, devido aos custos reduzidos de deposição em aterro face aos custos de processamento e transporte. Na figura 19 é apresentado o fluxograma de materiais neste cenário.

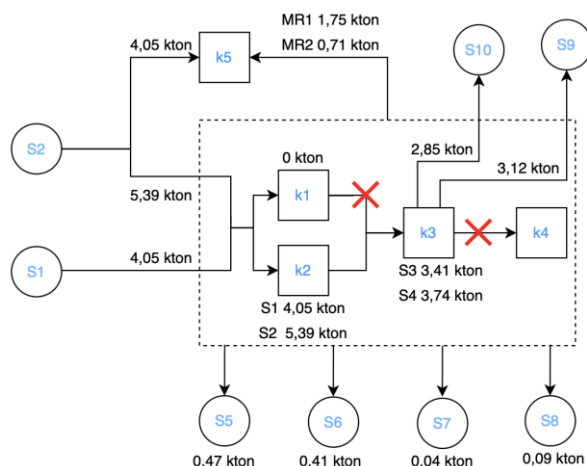


Figura 19 – Fluxograma de materiais no cenário base do modelo reduzido

Conforme pode ser observado no fluxograma, todo resíduo S1 foi enviado para tratamento, enquanto S2 foi tanto para aterro quanto para processamento. Isso ocorre pois o custo de processamento de S1 é mais de sete vezes inferior ao de S2, como foi apresentado na secção 4.2.4. Além disso, não foram utilizadas as centrais de triagem, visto que o processo de triagem incorporada foi suficiente para triar todos os RCD, evitando custo de transporte.

A figura 20 ilustra os resultados em cada um dos 12 meses considerados no modelo. São apresentados os custos do processo, do aterro e o custo total, além da capacidade disponível utilizada. Importa mencionar que no custo do processo foi retirado o custo de investimento em novas centrais, pois distorcia os valores do gráfico. Foram criadas em junho (t6) duas centrais, sendo uma de triagem incorporada (k2) e uma de reciclagem LQ (k3), ambas com capacidade de 4.167 toneladas por mês (kc1). Justamente devido à criação destas centrais a percentagem de capacidade utilizada tem uma queda acentuada após t5, visto que as centrais pré-existent não possuem capacidade suficiente para reciclar 70% dos RCD produzidos, mas após criar um nova central, a capacidade é mais do que suficiente. Os valores mensais dos fluxos de materiais e das capacidades utilizadas podem ser consultados na tabela 62 do Anexo XI.

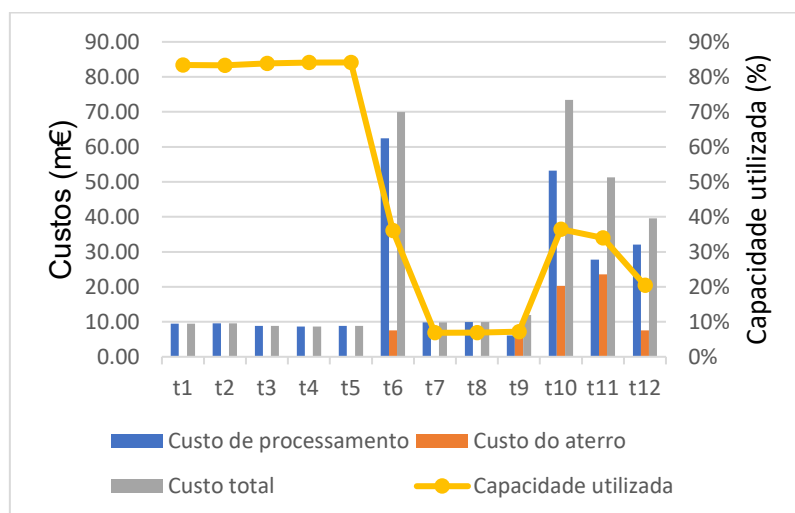


Figura 20 – Resultados mensais do cenário base do modelo reduzido

5.3.2.2 Cenário Comparativo

O cenário comparativo busca conferir se os valores do modelo atual condizem com o modelo reduzido desenvolvido por Andrade (2015), sendo assim necessária a alteração de cinco parâmetros, pois não faz sentido comparar dois modelos com parametrizações diferentes.

A primeira alteração é relativa ao parâmetro X_{rec} , que define a percentagem mínima de RCD que deve ser reciclada, e para este cenário foi lhe atribuído o valor zero, visto que no modelo de Andrade (2015) não existia nenhuma restrição quanto à quantidade mínima reciclada, possibilitando que todos os resíduos fossem destinados a aterro. Outra mudança foi na matriz de transformação, que teve algumas alterações (a matriz utilizada por Andrade (2015) é apresentada no Anexo X). O terceiro parâmetro modificado foi o das capacidades dos processos pré-existentes, pois desde a pesquisa de Andrade (2015) alguns alvarás foram atualizados, modificando as capacidades autorizadas das empresas. As capacidades utilizadas neste cenário são apresentadas na tabela 29.

Tabela 29 – Capacidades consideradas no cenário comparativo do modelo reduzido

Nó	Processos	Capacidade modelo	
		Andrade(2015) (ton/ano)	Considerada (ton/mês)
i33	k1	400	33,33
i19	k2 e k3	3.100	258,33
i24	k2 e k3	1.200	100
i24	k5	Capacidade dos aterros é ilimitada	

Diretamente ligado à alteração das capacidades, o custo de processamento dos materiais também foi atualizado. Os valores de Andrade (2015) que são utilizados neste cenário reduzido são apresentados na tabela 30.

Tabela 30 – Matriz de Custo de Processamento de Andrade (2015)

	S1	S2	S3	S4	S10
k1	2,56	20			
k2	2,29	17,89			
k3			1,91	1,91	
k4					10

Por fim, o último parâmetro modificado é referente ao custo de deposição em aterro de S1 (betão) e MR1 (Matéria Residual 1), que no modelo de Andrade (2015) possuem os valores de 5,50€/ton e 40€/ton respectivamente.

Na tabela 31 é feita uma comparação entre as estatísticas do modelo reduzido de Andrade (2015) e as estatísticas do modelo reduzido atual.

Tabela 31 – Estatísticas do modelo reduzido de Andrade (2015) e do cenário comparativo

Modelo	Nº de equações	Nº de variáveis	Nº de variáveis discretas	Nº de iterações	Tempo para gerar dados (s)	Tempo de execução (s)	Desvio relativo (%)
Andrade	573	2.849	314	67	0,031	0,156	0,0
Atual	9.708	32.127	3.240	1.206	0,797	0,734	0,0

Por conta do grande aumento no número de equações e variáveis, o tempo de execução mais que quadruplicou do modelo de Andrade (2015) para o atual. Contudo, a validação do modelo ocorreu com êxito, visto que os resultados de ambos os modelos foram exatamente iguais, sendo os principais dados apresentados na tabela 32.

Tabela 32 – Dados de *output* do cenário comparativo

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	0,0
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	13.492
Percentagem de RCD reciclados	0,0
Percentagem de RCD depositados em aterro	100,0
Capacidade utilizada média (%)	0,0
Custo de processamento (k€)	0,00
Custo de deposição direta em aterro (k€)	215,59
Custo total (k€)	215,59

Neste cenário comparativo, onde não existe percentagem mínima de RCD que deve reciclado, todos os RCD foram depositados em aterro, acarretando um custo de 215,59 k€. Este resultado era expectável por conta do baixo custo de deposição em aterro quando comparado com o custo de processamento dos resíduos. A figura 21 ilustra o fluxograma de materiais deste cenário.

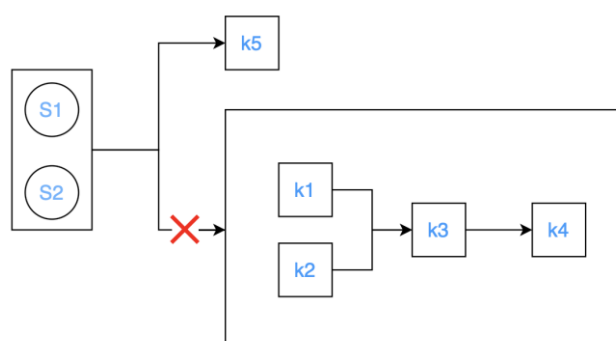


Figura 21 – Fluxograma de materiais no cenário comparativo do modelo reduzido

Na tabela 63 do Anexo XI são apresentados os fluxos mensais dos RCD, onde todos os resíduos produzidos em todos os nós são destinados ao aterro do nó i24 (Corroios), pois é o único aterro do

modelo reduzido. É interessante observar que, até o mês de setembro (t9), apenas 43,61% dos resíduos produzidos até este período foram destinados aos aterros, ou seja, nos nove primeiros períodos foram depositados 4,8 kton de RCD, enquanto nos três últimos foram 8,7 kton.

5.3.2.3 Cenário Livre

No cenário livre são analisadas as hipóteses onde o X_{rec} equivale a 0 (sem obrigatoriedade de reciclar os RCD) e a 1 (todos os resíduos devem ser reciclados). Por mais que no cenário comparativo (secção anterior) o parâmetro X_{rec} já tenha assumido o valor 0, os parâmetros eram diferentes, então nesta secção é feita uma análise com base nos parâmetros deste trabalho. A tabela 33 apresenta os dados de *output* deste cenário.

Tabela 33 – Dados de *output* do cenário livre

Dados de <i>output</i>	$X_{rec} = 0$	$X_{rec} = 1$
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	1.992	13.492
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	11.500	0,0
Porcentagem de RCD reciclados	14,8	100,0
Porcentagem de RCD depositados em aterro	85,2	0,0
Capacidade utilizada média (%)	40,7	21,5
Custo de processamento (k€)	29,90	1.699,62
Custo de deposição direta em aterro (k€)	198,68	0,00
Custo total (k€)	228,58	1.699,62

Como era suposto, o custo total do cenário base (1.611,40 k€) se encontra entre os valores dos custos deste cenário. Relativamente ao caso em que $X_{rec} = 1$, a diferença do custo total para o cenário base é de apenas 88,22 k€, e a principal causa desta diferença ser pequena é que o custo de investimento em novas centrais é igual nos dois casos (1.300 k€), ou seja, esta diferença significa unicamente o custo de processamento e transporte dos materiais que no cenário base foram depositados em aterro.

É interessante observar que a percentagem de capacidade utilizada no caso em que todos os resíduos são reciclados é aproximadamente a metade do que no caso em que 14,8% dos resíduos são reciclados. Isso se deve a que, na situação em que $X_{rec} = 0$, a capacidade das centrais pré-existentes é suficiente para reciclar a quantidade de RCD que são processados, e no caso em que $X_{rec} = 1$, é necessário abrir duas novas centrais (processos k2 e k3, ambas no período t1 e com capacidade de 4.167 ton/mês), ficando com capacidade em excesso. Na tabela 64 do Anexo XI são apresentados os fluxos mensais de materiais deste cenário.

Na figura 22 são ilustrados os fluxogramas de materiais para os dois casos do cenário livre, e como pode ser constatado, quando $X_{rec} = 0$, todo material S1 que é reciclado é destinado ao processo k2, e isto ocorre, pois, a triagem incorporada tem capacidade suficiente para triar as 1,99 kton de S1 que são processadas, evitando assim custos de transporte para o processo k3. Já na situação em que $X_{rec} = 1$, S2 é totalmente destinado a k2, enquanto S1 vai tanto para k1 quanto para k2. Neste caso, existe uma

certa quantidade de RCD que é destinada para o processo k1, pois a produção do resíduo ocorre no mesmo nó em que existe a central de triagem (nó i33 (Barreiro)). Nenhum material S2 é enviado para o processo k1 pois a percentagem de capacidade utilizada deste processo já é igual a 100% apenas com o tratamento de S1, além de ser significativamente mais caro triar S2 em k1 (25€/ton) do que S1 neste mesmo processo (3,36€/ton).

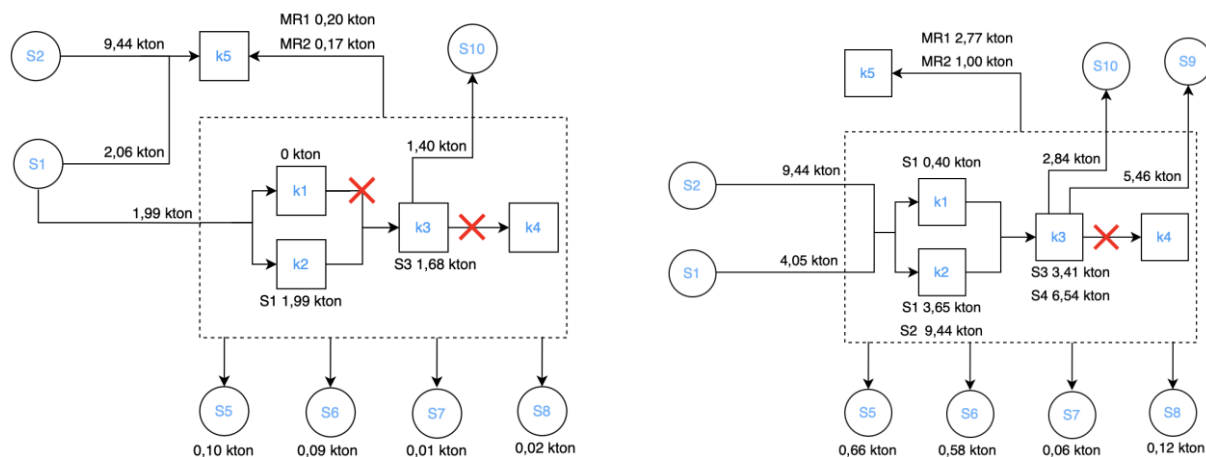


Figura 22 – Fluxogramas de materiais no cenário livre do modelo reduzido (Esquerda: $X_{rec} = 0$; Direita: $X_{rec} = 1$)

No modelo desenvolvido para este trabalho, quando $X_{rec} = 0$, são reciclados 14,8% dos RCD produzidos, diferentemente do cenário comparativo, em que todos os resíduos foram depositados em aterro. Isto se deve principalmente pelo maior custo de deposição em aterro do material S1 que foi considerado neste trabalho, face ao trabalho de Andrade (2015). Ao analisar estes 14,8% de RCD que foram reciclados, pode ser observado com base na tabela 34 que os custos de processamento e transporte dos materiais S1 e S3, somados aos custos de transporte e deposição em aterro de MR1 e MR2, resultam em um valor de 46,15 k€, enquanto a venda dos materiais reciclados gera uma receita de 16,25 k€, acarretando um custo total de 29,90 k€. Em contrapartida, caso estas 1.992 toneladas de S1 fossem depositadas diretamente em aterro, custaria 30,27 k€, ou seja, a reciclagem destes resíduos resultou numa economia de 370,00€.

Tabela 34 – Custos e receitas dos 14,8% de RCD reciclados quando $X_{rec} = 0$

Custos/receitas	Valores
Custo de processamento de S1 em k2	4.940,16€
Custo de transporte de S1	7.449,54€
Custo de processamento de S3 em k3	3.458,04€
Custo de deposição em aterro de MR1	9.960,00€
Custo de transporte de MR1	653,38€
Custo de deposição em aterro de MR2	19.136,71€
Custo de transporte de MR2	550,60€
Custo total de processamento e transporte destes materiais	46.148,42€
Receita com a venda de S5, S6, S7, S8 e S10	16.247,90€
Diferença entre o custo e receita	Custo de 29.900,55€

5.3.3 Síntese conclusiva do modelo de dimensão reduzida

Com base nos cenários elaborados para o modelo reduzido é possível validar o modelo pois, ao analisar os resultados, torna-se notório que estes são coerentes com a formulação matemática desenvolvida. No cenário base, em que existe a obrigatoriedade de reciclar pelo menos 70% dos resíduos conforme a legislação europeia, é processada exatamente a quantidade mínima exigida. Isso ocorre por conta dos baixos preços de deposição em aterro que são praticados em Portugal.

Ao comparar o modelo atual com o de Andrade (2015), é possível observar que os resultados são idênticos, sendo esta uma comparação importante para validação da formulação matemática. Por fim, no cenário livre é constatado que, no caso de reciclagem de 100% dos RCD, o custo total não é significativamente maior do que no cenário base, pois não é necessária a abertura de novas centrais. Além disso, é possível verificar que, por conta do aumento no preço de deposição em aterro face ao modelo de Andrade (2015), mesmo sem a exigência de se reciclar os resíduos, quase 15% dos RCD são tratados.

5.4 Modelo aplicado às 211 freguesias da AML

Nesta secção o modelo desenvolvido é aplicado às 211 freguesias da AML que são consideradas neste trabalho. Inicialmente são avaliados os resultados de um conjunto de cenários e, em sequência, é feita uma análise de sensibilidade a alguns dos principais parâmetros da modelação.

5.4.1 Análise de cenários

São analisados três cenários nesta secção, sendo o primeiro baseado nas políticas de reciclagem de RCD da UE e o segundo sem obrigatoriedade de se reciclar. Em sequência é analisado um cenário hipotético onde é obrigatória a instalação de um processo k4 na AML.

5.4.1.1 Cenário A

O primeiro cenário é semelhante ao cenário base do modelo reduzido, sendo a única diferença o número de freguesias consideradas (recorde-se que neste cenário se estabeleceu uma percentagem mínima de 70% de reciclagem de RCD). Os dados de *input* utilizados são os descritos na secção 5.1, e as principais estatísticas deste modelo são apresentadas na tabela 35.

Tabela 35 – Estatísticas do modelo para o Cenário A

Nº de equações	Nº de variáveis	Nº de variáveis discretas	Nº de iterações	Tempo para gerar dados (s)	Tempo de execução (s)	Margem de optimalidade (%)
206.100	9.333.927	74.304	1.037.256	261,47	26.348,17	0,0

Foram necessárias cerca de 7 horas e 19 minutos de tempo de execução para chegar à solução óptima do modelo (requerendo 1.037.256 iterações), existindo 206.100 equações e 9.333.927 variáveis no mesmo, das quais 74.304 são discretas. Na tabela 36 são apresentados os principais dados de *output* deste cenário.

Tabela 36 – Dados de *output* do cenário A

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	418.278,70
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	179.262,30
Percentagem de RCD reciclados	70,0
Percentagem de RCD depositados em aterro	30,0
Capacidade utilizada média (%)	24,5
Custo de processamento (M€)	13,16
Custo de deposição direta em aterro (M€)	3,89
Custo total (M€)	17,05

São reciclados exatamente 70% dos RCD produzidos, pois é a percentagem mínima especificada na modelação deste cenário A. O custo total foi de 17,05 M€, sendo que não foi necessária a abertura de nenhuma nova central, ou seja, mesmo sem existir custo de investimento, o custo de processamento foi responsável por 77,2% custo do total. A figura 23 ilustra os valores mensais dos custos e da capacidade utilizada.

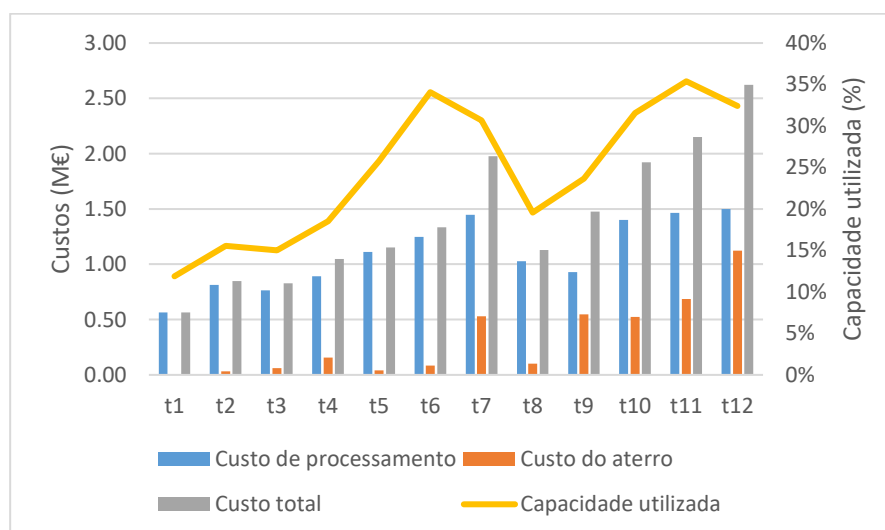


Figura 23 – Resultados mensais do cenário A

Como pode ser observado, a capacidade utilizada tem seu mínimo em t1 (11,9%) e seu máximo em t11 (35,4%), sendo a média inferior a 25%. Esta percentagem média tem um valor reduzido devido à elevada capacidade das centrais pré-existentes, que é de 1.948,98 kton/ano para os processos de triagem (k1 e k2) e de 1.149,20 kton/ano para o processo de reciclagem LQ, face às 597,54 kton de RCD produzidas anualmente. Vale ressaltar que, assim como foi citado anteriormente, as capacidades consideradas no modelo são baseadas no alvará das empresas, e segundo Andrade (2015), as capacidades autorizadas nem sempre refletem as capacidades reais.

Outro ponto importante a ser analisado é relativamente ao aumento do custo total entre t6 e t7, embora a capacidade utilizada nestes mesmos períodos decresça de 34,1% para 30,7%. Isso se deve por duas razões:

- O custo do aterro em t7 é de 0,53 M€, o que representa 26,8% do custo total deste período, enquanto em t6 este mesmo custo é de apenas 0,09 M€, sendo o equivalente a 6,4% do custo total;
- Em t6 são triadas 47,35 toneladas de RCD, enquanto em t7 esse valor diminui para 43,87 toneladas, o que explica a redução na capacidade utilizada. Contudo, em t6 vão para triagem 30,07 toneladas de S1 e 17,28 toneladas de S2, e em t7 são triadas 16,90 toneladas de S1 e 26,97 toneladas de S2, e como o custo de triagem de S2 é mais de sete vezes o custo de triar S1, o custo de processamento aumenta, mesmo com uma menor capacidade utilizada.

A Figura 24 mostra o fluxograma dos materiais neste cenário A, e na tabela 65 do Anexo XII são apresentados os valores mensais dos fluxos de materiais.

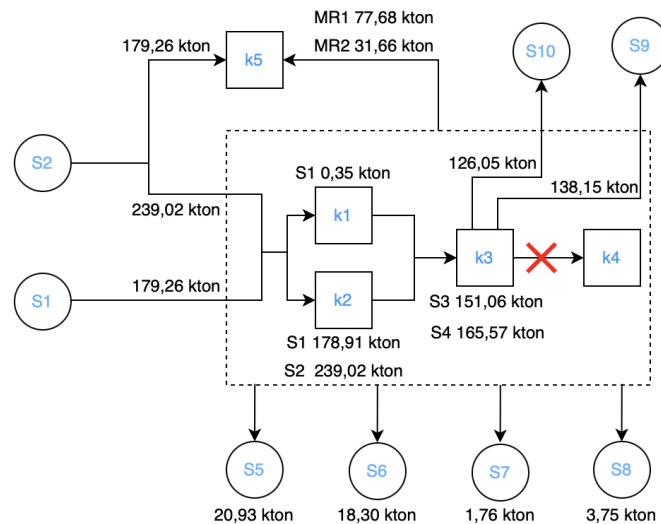


Figura 24 – Fluxograma de materiais do cenário A

Enquanto todo o resíduo S1 é processado, S2 vai tanto para aterro quanto para reciclagem. Isso se deve novamente ao maior custo de processamento do material indiferenciado, sendo mais rentável depositar S2 em aterro do que S1.

Relativamente aos processos, nenhum processo k4 é instalado, e todas as seis centrais pré-existentes de triagem incorporada e reciclagem LQ são utilizadas, reduzindo os custos de transporte, pois assim os resíduos são enviados para a central mais próxima aos seus nós de produção.

5.4.1.2 Cenário B

Neste segundo cenário, são considerados os mesmos dados de input do cenário anterior, com exceção do parâmetro X_{rec} , que no cenário A era igual a 0,7, e neste cenário B é igual a zero, de modo que nenhum resíduo precise ser reciclado. Na tabela 37 são apontados os principais dados de *output*.

Tabela 37 – Dados de *output* do cenário B

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	50.003,40
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	547.537,60
Percentagem de RCD reciclados	8,4
Percentagem de RCD depositados em aterro	91,6
Capacidade utilizada média (%)	3,1
Custo de processamento (M€)	0,91
Custo de deposição direta em aterro (M€)	11,90
Custo total (M€)	12,81

Sem a obrigatoriedade de reciclar os RCD, foram tratados apenas 8,4% dos resíduos produzidos, o que demonstra que é mais vantajoso economicamente depositar os resíduos em aterro. Relativamente ao custo total, reciclar 8,4% dos RCD produzidos gerou uma economia de 4,24 M€ quando comparado com a reciclagem de 70% dos resíduos do cenário A. Contudo, esta não é uma diminuição de custos vantajosa, visto que ambientalmente é mais prejudicial.

Na figura 25 são apresentados os valores mensais dos custos e das capacidades utilizadas no cenário B. Pelo fato de não ser obrigatório reciclar resíduos, o custo de deposição em aterros encontra-se sempre muito próximo do custo total, o que é esperado, visto que no resultado anual o custo de deposição direta corresponde a 92,9% do custo total.

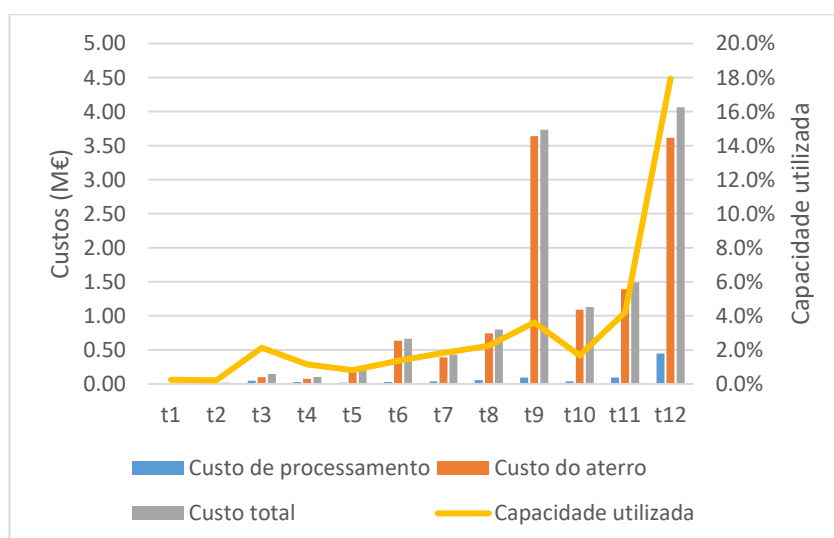


Figura 25 – Resultados mensais do cenário B

O custo de deposição em aterro possui dois “picos” (valores máximos), sendo o primeiro em t9, ou seja, logo a seguir aos quatro períodos de maior produção de RCD (de t5 a t8 são produzidos 50% dos resíduos anuais). O segundo ocorre juntamente com o único pico do custo de processamento, que é no último período. Isto ocorre, pois, sendo o último mês da modelação, todos resíduos produzidos em períodos anteriores e que não foram reciclados ou aterrados, precisam ter um destino. O custo de processamento em t12 equivale a 49% do custo de processamento anual deste cenário. Na figura 26 é ilustrado o fluxograma de materiais deste cenário.

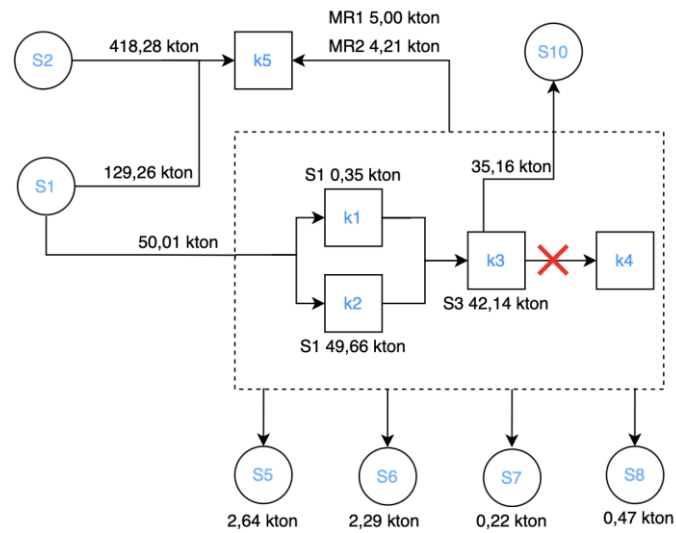


Figura 26 – Fluxograma de materiais do cenário B

Neste cenário é apenas reciclado betão, sendo triado em k1 e k2, embora mais de 99% vá para a triagem incorporada (k2). Das onze centrais de triagem (k1) existentes, apenas duas são utilizadas, e para os processos k2 e k3 são utilizadas quatro das seis centrais existentes. Como o resíduo S2 é todo destinado a aterro, não existe venda de S9, enquanto as 35,16 kton de S10 produzidos geraram uma receita de 58.013,73€. Os valores dos fluxos de materiais mensais deste cenário são apresentados na tabela 66 do Anexo XII.

5.4.1.3 Cenário C

Visto que o processo k4 não existe na AML e não foi instalado em nenhum dos cenários analisados nas secções anteriores, no cenário D é adicionada a equação [30] ao modelo, de modo que seja obrigatória a criação de uma central de reciclagem HQ.

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} Y_{k,i,t} \geq 1 \quad \text{para } k = k4 \quad [30]$$

Na tabela 38 são apresentados os principais dados de *output* deste cenário.

Tabela 38 – Dados de *output* do cenário C

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	418.278,70
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	179.262,30
Percentagem de RCD reciclados	70,0
Percentagem de RCD depositados em aterro	30,0
Capacidade utilizada média (%)	23,6
Custo de processamento (M€)	14,04
Custo de deposição direta em aterro (M€)	3,89
Custo total (M€)	17,93

Apesar de ter sido criada a reciclagem HQ, nenhum material foi processado neste tipo de central, o que demonstra não ser rentável transformar S10 (betão reciclado LQ) em S11 (betão reciclado HQ), mesmo com a instalação aberta. Assim sendo, o modelo instalou um processo k4 no período t12 com a menor capacidade possível (4.167 ton/mês), de forma a reduzir o custo. Além disso, como a central não foi utilizada, esta poderia ser criada em qualquer nó, e o modelo definiu de modo aleatório utilizar o nó i54 (Mártires).

Os dados de *output* obtidos são semelhantes aos do cenário A, com exceção da percentagem de capacidade utilizada, do custo de processamento e, conseqüentemente, o custo total. A capacidade utilizada no período t12 teve uma redução de 32,4% (cenário A) para 21,6% (cenário D), acarretando uma queda de 0,9 pontos percentuais da capacidade utilizada média. O custo de processamento e o custo total tiveram um aumento de 0,88M€, correspondente ao custo de instalação da nova central.

O fluxograma e os valores mensais do fluxo de materiais deste cenário não são apresentados, pois são idênticos ao do cenário A (figura 24 da secção 5.4.1.1 e tabela 65 do Anexo XII, respectivamente).

5.4.2 Análise de Sensibilidade

Nesta secção é feita uma análise de sensibilidade a alguns dos parâmetros do modelo, de modo a avaliar o efeito que estes têm nos resultados. A análise é feita com base no cenário A, ou seja, em cada novo cenário um parâmetro é alterado, enquanto os restantes dados de *input* são os descritos na secção 5.1.

5.4.2.1 Cenário D

A primeira análise de sensibilidade é relativa ao parâmetro $h_{i,s}$. Como foi citado na secção 5.1, é considerado no modelo que, do total de RCD produzidos, 30% correspondem a S1 e os restantes 70% a S2, de acordo com dados de Coelho (2012). Assim, neste cenário são analisados os resultados caso a produção de resíduos seja igualmente dividida entre S1 e S2, ou seja, 50% dos resíduos produzidos

equivalem a betão e os outros 50% a material indiferenciado. Na tabela 39 são apresentados os dados de *output* deste cenário.

Tabela 39 – Dados de *output* do cenário D

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	418.278,70
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	179.262,30
Percentagem de RCD reciclados	70,0
Percentagem de RCD depositados em aterro	30,0
Capacidade utilizada média (%)	25,3
Custo de processamento (M€)	10,37
Custo de deposição direta em aterro (M€)	3,89
Custo total (M€)	14,26

Novamente são reciclados exatamente 70% dos resíduos, pois embora a distribuição dos RCD tenha sido alterada, os custos são mantidos. De modo semelhante ao cenário A, a totalidade de S1 é enviada para processamento, enquanto S2 vai tanto para triagem quanto para aterro, com a diferença de que no primeiro cenário foram triadas 239,02 kton de material indiferenciado (S2) e 179,26 kton de betão (S1), e neste cenário os valores são de 119,51 kton de S2 e 298,77 kton de S1. Estes dados são ilustrados no fluxograma da figura 27.

Em consequência do aumento de S1 e redução de S2 reciclados, a percentagem de capacidade utilizada subiu de 24,5% no cenário A para 25,3% no cenário D. Isto ocorre pois, com base na matriz de transformação (secção 4.2.2), triar S1 gera 84,27% de S3, enquanto processar S2 na triagem incorporada gera apenas 69,27% de S4. Assim, a capacidade utilizada do processo k3 neste cenário é maior, aumentando a percentagem de capacidade utilizada média.

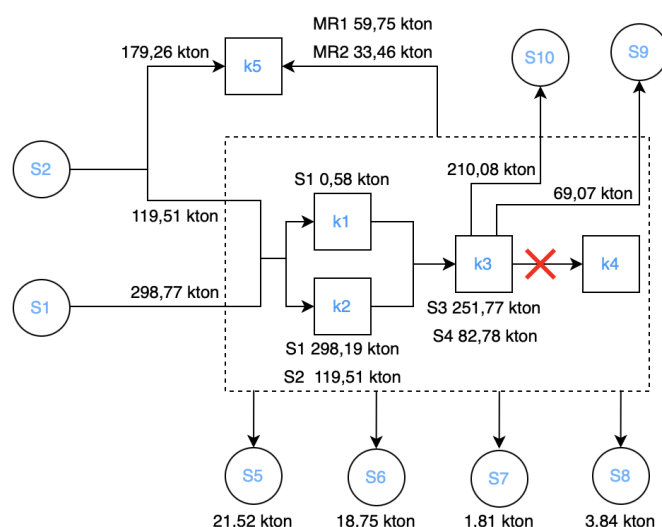


Figura 27 – Fluxograma de materiais do cenário D

O custo de deposição direta em aterro é igual nos cenários A e D, visto que é depositada exatamente a mesma quantidade de S2 em ambos os casos (179,26 kton). Contudo, o custo de processamento teve uma redução de 2,79 M€ neste cenário, pois o gasto para triar S1 é inferior ao de S2.

Na figura 28 são apresentados os valores mensais dos custos e da capacidade utilizada no cenário D. A percentagem de capacidade utilizada possui um crescimento acentuado a partir de t5, e isso se deve à maior produção de RCD a partir deste mês e, em consequência, o custo de processamento acompanha este crescimento.

Os três maiores valores do custo total ocorrem nos períodos t8, t9 e t12, influenciados pelo custo de deposição direta em aterro, que também possui seus picos nos mesmos períodos. Os valores mensais dos fluxos de materiais são apresentados na tabela 67 do Anexo XII.

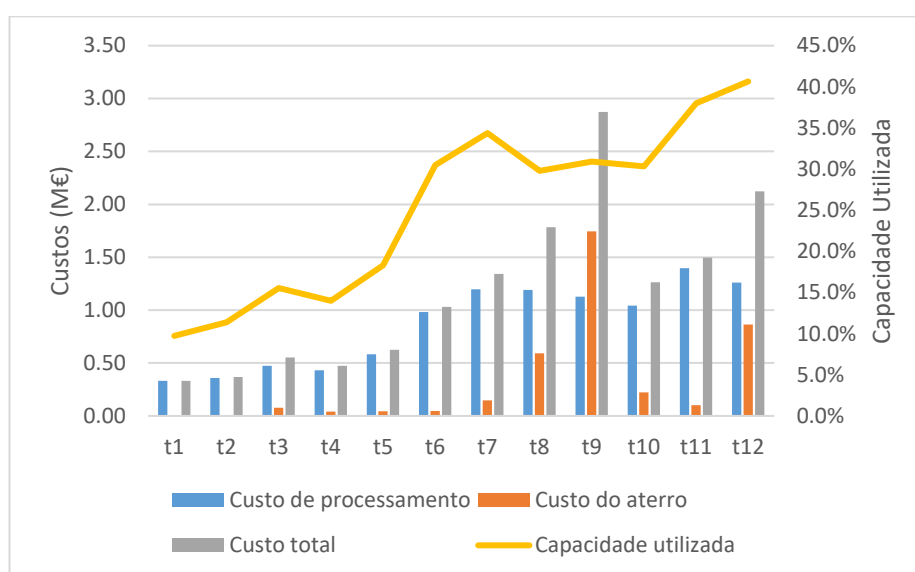


Figura 28 – Resultados mensais do cenário D

5.4.2.2 Cenário E

Com base nos alvarás das empresas, a AML possui capacidade suficiente para reciclar todos os RCD produzidos, visto que a produção de resíduos considerada é de 597,54 kton. Contudo, de acordo com Andrade (2015), a capacidade real das centrais corresponde a aproximadamente 20% das capacidades autorizadas. Assim, neste cenário E é alterado o parâmetro $kup_{k,i}$, que representa a capacidade das centrais pré-existentes. Na tabela 40 são apresentadas as capacidades totais autorizadas dos processos e as capacidades que são utilizadas neste cenário (20% da autorizada).

Tabela 40 – Capacidades autorizadas e a 20%

Capacidades (kton)	
Triagem autorizada	1.948,98
Reciclagem autorizada	1.149,20
Triagem a 20%	389,80
Reciclagem a 20%	229,84

Com a redução da capacidade pré-existente, é preciso instalar novas centrais de triagem e reciclagem de modo que seja possível reciclar os 70% dos resíduos como é estipulado. Contudo, devido ao alto grau de liberdade que o modelo possui, poderiam ser criados processos em qualquer um dos 211 nós, desde que este ainda não possua o respectivo processo instalado. Esta elevada autonomia da modelação, juntamente com a necessidade de instalação de novos processos, torna este cenário mais complexo, de modo que o computador utilizado para resolver o modelo não permitiu obter a solução óptima em tempo útil (ou seja, após inúmeras horas de computação). Assim sendo, foi adicionado ao modelo um novo parâmetro binário ($Permite_{i,k}$) que determina em quais os nós onde podem ser instalados novos processos, sendo adicionado às restrições [8] e [9]. Deste modo, a variável binária $Y_{k,i,t}$ só pode assumir o valor 1 caso o parâmetro $Permite_{i,k}$ também seja 1. Importa salientar que, no presente trabalho, este parâmetro é utilizado apenas neste cenário.

Foram analisados três casos, sendo que no primeiro era permitida a instalação de novos processos em 15 nós, o segundo caso em 30 nós e, por fim, o último caso admitia a instalação em 45 nós. Os valores do novo parâmetro foram definidos de forma aleatória, e em todos os casos os resultados dos custos foram semelhantes, de modo que a única alteração entre os casos é relativa ao nó onde são criados os novos processos. Na tabela 41 são apresentados os principais dados de *output* do cenário E.

Tabela 41 – Dados de *output* do cenário E

Dados de <i>output</i>	
Quantidade de RCD reciclados (ton/ano)	418.278,70
Quantidade de RCD depositados diretamente em aterros (ton/ano)	179.262,30
Percentagem de RCD reciclados	70,0
Percentagem de RCD depositados em aterro	30,0
Capacidade utilizada média (%)	77,1
Custo de processamento (M€)	14,16
Custo de deposição direta em aterro (M€)	3,89
Custo total (M€)	18,05

De maneira semelhante ao cenário A, foram reciclados 70% dos RCD produzidos, mas o custo de processamento foi 1M€ mais caro, pois foi preciso instalar dois novos processos, sendo um k2 e um k3, com capacidade de 200.000 ton/ano e 150.000 ton/ano respectivamente.

A capacidade utilizada média é de 77,1%, sendo este o cenário com maior percentagem de utilização analisado neste trabalho. Isto ocorre pois, como a capacidade inicial não é suficiente, o modelo instala a capacidade mínima necessária. Na figura 29 são apresentados os custos e capacidade utilizada para cada período.

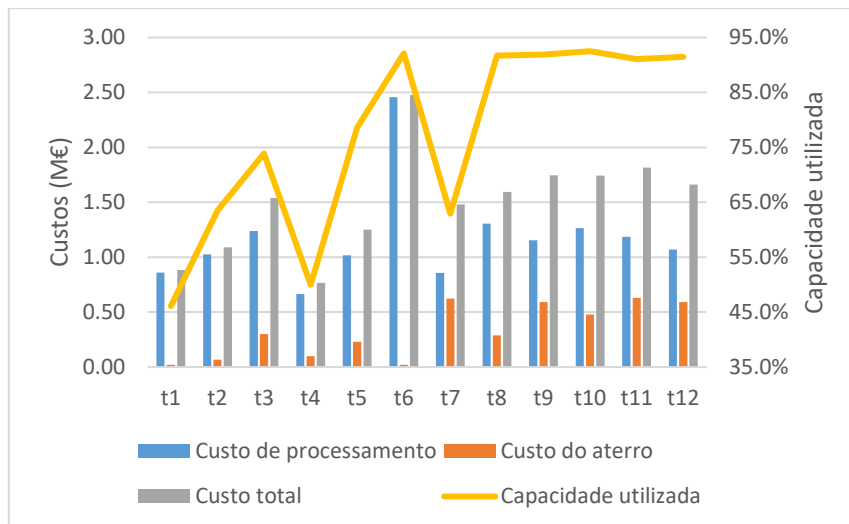


Figura 29 – Resultados mensais do cenário E

A capacidade utilizada mínima ocorre em Janeiro (t1), visto que é o período em que menos resíduos são produzidos. Um fator interessante é que a capacidade utilizada em t6 é próximo ao de t8 a t12, mas o custo de processamento é maior. Isto se deve ao fato de que em Junho é reciclado mais S2 do que S1, e nos outros períodos ocorre o inverso. Assim, o custo para reciclar os resíduos e depositar em aterro as matérias residuais fica mais elevado. O fluxograma deste cenário é idêntico ao do cenário A (figura 24), e por isso não é apresentado nesta secção.

5.4.2.3 Restantes cenários

Nesta secção são apresentados os restantes cenários da análise de sensibilidade efetuada. Na tabela 42 são indicados os principais dados de *output* de todos os cenários do modelo, sendo apresentados tanto os cenários descritos nas secções anteriores quanto os novos.

Os 21 cenários estão divididos em dois grupos, sendo que nos dez primeiros é obrigatório reciclar um mínimo de 70% dos RCD produzidos, e nos restantes não existe nenhuma obrigatoriedade quanto a reciclagem.

De notar que para os novos cenários criados (F a U), nenhum novo processo k1, k2 ou k3 é instalado, pois a capacidade das centrais pré-existentes na AML é suficientemente elevada para triar e reciclar os resíduos produzidos. Além disso, não é instalado nenhum processo de reciclagem HQ (k4), pois não é vantajoso economicamente, como foi observado no cenário C na secção 5.4.1.3.

Nos novos cenários em que é atribuído o valor 0,7 ao parâmetro X_{rec} (cenários F a K), são consideradas variações positivas e negativas de 20% em alguns parâmetros do modelo. Em todos os casos são reciclados exatamente 70% dos resíduos, com uma capacidade utilizada média de 24,5%.

Nos cenários F e G são alterados os preços de venda dos materiais (e_s), e como a taxa de reciclagem não sofreu variação em nenhum dos casos, a única diferença ocorre nos custos. No cenário F o custo de processamento aumenta 0,62 M€, pois a receita com as vendas é menor, enquanto no cenário G

acontece o inverso. Com isso, o custo total da rede sofre variações positivas e negativas de 3,6% nestes dois casos.

Nos cenários H e I é alterado o parâmetro cda_s (custo de deposição direta em aterro) para os resíduos S1 e S2. O primeiro caso, com uma variação negativa no custo de deposição dos RCD, ocasiona uma redução de 0,55 M€ no custo total. Já no cenário I, em que é incrementado o valor pago para depositar os resíduos em aterro, o custo total aumenta em 0,52M€.

Nos cenários J e K também é alterado o custo de deposição em aterro, mas nestes casos para as matérias residuais. Assim sendo, o custo que sofre variação nestes cenários é o de processamento e, conseqüentemente, o custo total. Quanto maior o custo de deposição em aterro de MR1 e MR2, maior será o custo de processar os resíduos, aumentando o custo da rede (8,9% a mais que no cenário A). Em contrapartida, quando menor forem os valores de deposição em aterro destes materiais, mais económico é o processo, apresentando uma redução de 8,7% no custo da rede frente ao cenário A.

Relativamente aos cenários em que X_{rec} é igual a 0, dez são novos (L a U), enquanto o cenário B foi analisado na secção 5.4.1.2. Nos seis primeiros cenários (L a Q), as modificações nos parâmetros do modelo são semelhantes às realizadas nos cenários F a K, ou seja, variações positivas e negativas de 20%. Por fim, nos últimos quatro cenários (R a U) são feitos aumentos graduais de 20% no custo de deposição em aterro dos RCD. De realçar que, para análise destes dez últimos cenários, é utilizado o cenário B como cenário base, visto que o cenário A possui o parâmetro X_{rec} com valor de 0,7.

Em L e M efetua-se uma variação ao preço de venda dos materiais (e_s) que podem ser vendidos (S5, S6, S7, S8, S9, S10 e S11). Com o aumento deste parâmetro (cenário M), a taxa de reciclagem cresce em 1,9 pontos percentuais quando comparado ao cenário B, aumentando o custo de processamento mas reduzindo o custo total para 74,6 M€ (redução de 0,5 M€ face ao cenário B). Já no cenário L, em que o preço de venda é diminuído, a taxa de reciclagem reduz para 6,2%, enquanto o custo total sobe para 12,88 M€.

O parâmetro alterado nos cenários N e O é o custo de deposição em aterro (cda_s) das matérias residuais. No cenário N, em que o custo de deposição de MR1 e MR2 é reduzido em 20%, o efeito nos resultados é significativo, obtendo-se uma taxa de reciclagem de 30% dos RCD, e mesmo com este aumento na percentagem de resíduos reciclados, o custo total da rede é de 73,4 M€, ou seja, 1,7M€ a menos que no cenário B. Isto ocorre pelos altos valores praticados no que respeita deposição em aterro destes materiais (50€/ton para MR1 e 114€/ton para MR2). No cenário O, em que o custo de deposição sobe 20%, a taxa de reciclagem cai 1,1 pontos percentuais, mas mesmo com menos resíduos reciclados, a custo total cresce 0,7 M€ face ao cenário B.

Tabela 42 – Principais dados de *output* dos cenários desenvolvidos

	Cenários	Parâmetros ou restrições alterados	Processos				Taxa de reciclagem	Taxa de deposição direta	Capacidade utilizada (%)	Custo de Processamento	Custo de Aterro (M€)	Custo Total (M€)	Custo Total (%)
			k1	k2	k3	k4	(%)	em aterro (%)		(M€)			
<i>X_{rec}</i> = 0,7	A	Base	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	13,16	3,89	17,05	100,0
	C	Instala k4	11	6	6	1	70,0	30,0	23,6	14,04	3,89	17,93	105,2
	D	$h_{i,s}$	11	6	6	0	70,0	30,0	25,3	10,37	3,89	14,26	83,6
	E	$kup_{k,i}$	11	7	7	0	70,0	30,0	77,1	14,16	3,89	18,05	105,9
	F	-20% e_s	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	13,78	3,89	17,67	103,6
	G	+20% e_s	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	12,54	3,89	16,43	96,4
	H	-20% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	13,17	3,34	16,51	96,8
	I	+20% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	13,17	4,42	17,58	103,1
	J	-20% cda_s (MR1 e MR2)	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	11,67	3,89	15,56	91,3
	K	+20% cda_s (MR1 e MR2)	11	6	6	0	70,0	30,0	24,5	14,68	3,89	18,57	108,9
<i>X_{rec}</i> = 0	B	<i>X_{rec}</i> = 0	11	6	6	0	8,4	91,6	3,1	0,91	11,90	12,81	75,1
	L	-20% e_s	11	6	6	0	6,2	93,8	2,3	0,74	12,14	12,88	75,5
	M	+20% e_s	11	6	6	0	10,3	89,7	3,8	1,02	11,70	12,72	74,6
	N	-20% cda_s (MR1 e MR2)	11	6	6	0	30,0	70,0	11,2	2,64	9,88	12,52	73,4
	O	+20% cda_s (MR1 e MR2)	11	6	6	0	5,3	94,7	2,0	0,67	12,25	12,92	75,8
	P	-20% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	6,0	94,0	2,2	0,66	10,65	11,31	66,3
	Q	+20% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	10,3	89,7	3,8	1,12	13,17	14,29	83,8
	R	+40% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	30,0	70,0	11,2	3,17	12,39	15,56	91,3
	S	+60% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	30,1	69,9	11,2	3,17	13,64	16,81	98,6
	T	+80% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	34,5	65,5	12,7	4,32	13,72	18,04	105,8
U	+100% cda_s (S1 e S2)	11	6	6	0	42,3	57,7	15,3	6,31	12,84	19,15	112,3	

Por fim, nos seis últimos cenários desta análise de sensibilidade é alterado o custo de deposição em aterro (cda_s) dos RCD (S1 e S2). No cenário P o custo é reduzido em 20%, enquanto de Q a U são feitos aumentos progressivos de 20%, de modo que no cenário U o custo de deposição em aterro de S1 e S2 seja o dobro do custo praticado no cenário B. Na tabela 43 são apresentados os preços de deposição em aterro para cada um destes cenários.

Tabela 43 – Preço de deposição em aterro dos cenários P, B, Q, R, S, T e U

Cenário	Variação	Preço praticado (€/ton)	
		S1	S2
P	-20% cda_s	7,04	12,00
B	cda_s	8,80	15,00
Q	+20% cda_s	10,56	18,00
R	+40% cda_s	12,32	21,00
S	+60% cda_s	14,08	24,00
T	+80% cda_s	15,84	27,00
U	+100% cda_s	17,60	30,00

O principal objetivo de serem feitas diversas análises com a variação deste parâmetro é de avaliar a efetividade do princípio do Poluidor-Pagador. Na figura 30 são ilustrados os custos e a taxa de reciclagem dos cenários presentes na tabela 43.

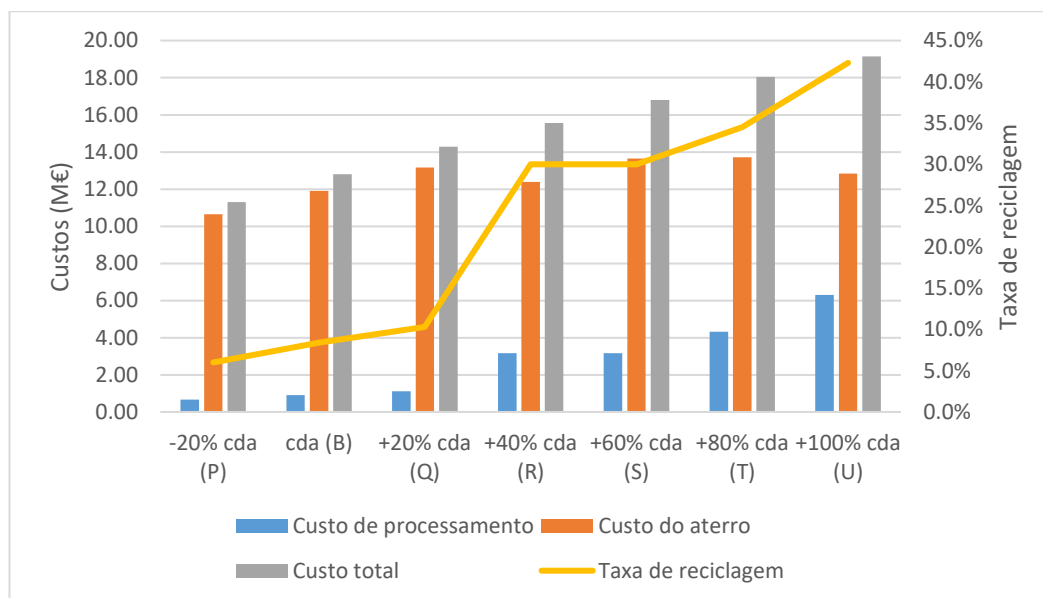


Figura 30 – Custos (M€) e taxa de reciclagem dos cenários P, B, Q, R, S, T e U

Como esperado, quanto maior o custo de deposição em aterro dos RCD, maior é a taxa de reciclagem e, conseqüentemente, o custo de processamento. Entre os cenários B e U, a percentagem de resíduos reciclados cresce de 8,4% para 42,3%, ou seja, enquanto o preço de deposição direta em aterro de S1

e S2 dobrou, a quantidade de resíduos reciclados mais que quintuplicou (de 50,0kton em B para 252,6kton em U), comprovando que o princípio do Poluidor-Pagador resulta.

5.4.3 Síntese conclusiva do modelo aplicado às 211 freguesias da AML

Com base na análise detalhada dos cenários A a E torna-se evidente que é mais viável economicamente depositar os resíduos em aterro do que os reciclar, visto que nos cenários em que *Xrec* recebe o valor 0,7 é reciclada a percentagem mínima obrigatória (70%), e no cenário B, em que não existe tal obrigatoriedade, são reciclados apenas 8,4% dos resíduos. Devido à elevada capacidade das centrais pré-existentes na AML, não foi necessária a instalação de novas centrais de triagem ou reciclagem, com exceção do cenário E, em que a capacidade pré-existente total da rede é reduzida a 20%, obrigando que sejam instalados dois processos, um k2 e um k3. Relativamente ao processo k4, este é instalado apenas no cenário C por conta da obrigatoriedade de instalação, e mesmo assim não é utilizado, de modo que todo o material S10 produzido é vendido ao invés de ser enviado para reciclagem HQ. No que se refere aos RCD, apesar de 70% dos resíduos corresponderem a S2, reciclar este material é mais dispendioso economicamente quando comparado com S1, de modo que deve ser priorizada a reciclagem do betão.

Nos restantes cenários em que é obrigatória a reciclagem de 70% dos resíduos (F a K), os resultados são coerentes com as variações de 20% (positivas e negativas) dos parâmetros. Em todos os casos foram reciclados 70% dos RCD, reforçando a conclusão de que é mais dispendioso reciclar os resíduos. O parâmetro que causou maior impacto nos resultados destes cenários foi o custo de deposição em aterro das matérias residuais (MR1 e MR2), de modo que quando este parâmetro é reduzido, o custo total é de 15,56 M€ (8,7% a menos que no cenário A), e quando é aumentado, o custo total sobe para 18,57 M€ (8,9% a mais face ao cenário A).

Por fim, nos cenários da análise de sensibilidade em que não é necessário reciclar nenhum resíduo (L a U), os resultados também são coerentes com as variações realizadas aos parâmetros. Dos cenários em que são feitas variações de 20% (L a Q), o parâmetro que mais afetou os resultados foi novamente o custo de deposição em aterro, mas nestes casos foi dos materiais S1 e S2, e não das matérias residuais. Em P o custo de deposição dos RCD é reduzido em 20%, ocasionando um custo total de 11,31 M€ (11,7% a menos que no cenário B e 33,7% a menos que em A). Já no cenário Q o custo de deposição em aterro de S1 e S2 aumenta 20%, acarretando um custo total de 14,29 M€ (11,6% a mais que em B, mas 16,2% a menos que o cenário A).

6. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Resumo do trabalho desenvolvido

O setor da construção foi responsável por mais de um terço dos resíduos produzidos na UE em 2016 (PORDATA, 2020), sendo de extrema importância tratar os RCD de modo eficaz. Por conta dos impactos ambientais, falta de territórios para aterros e limitados recursos naturais, o número de estudos relacionados com a GRCD tem aumentado nos últimos anos, visando melhorar esta gestão. Contudo, mesmo com uma maior quantidade de artigos publicados, poucos estudos se focam especificamente em modelos de otimização das redes de reciclagem. Deste modo, o presente trabalho apresenta uma abordagem inovadora, visto que é desenvolvido um modelo de otimização para o planeamento de uma rede de reciclagem de RCD considerando a vertente temporal. Esta nova abordagem busca aprimorar os trabalhos de Correia (2013) e Andrade (2015), de forma que os fluxos de materiais possam ser analisados para cada um dos períodos do horizonte temporal considerado.

O modelo de programação linear inteira mista (MILP) desenvolvido foi implementado no sistema de modelação GAMS, sendo resolvido com o solver CPLEX. A validação do modelo foi feita por meio de uma amostra reduzida, em que foram consideradas apenas 10 freguesias da área em estudo (AML – Área Metropolitana de Lisboa), facilitando a interpretação dos resultados. Posteriormente, o modelo foi aplicado às 211 freguesias da AML, com definição de múltiplos cenários para a sua resolução, o que incluiu uma análise de sensibilidade aos parâmetros mais relevantes.

Resultados e contribuições

O modelo elaborado permite a tomada de decisão sobre fatores importantes para uma eficaz GRCD, mais especificamente quanto ao tipo de processo a ser instalado, sua capacidade e localização, além do fluxo de materiais da rede (envolvendo o transporte dos mesmos). Os resultados obtidos estão diretamente ligados aos dados de *input* considerados, de modo que a qualidade da parametrização é imprescindível. A análise de resultados elaborada possibilitou verificar a influência que cada parâmetro estudado possui na modelação. Por mais que o modelo tenha sido aplicado a nível regional, a generalidade da modelação permite que este seja aplicado a nível nacional.

No caso de estudo, é possível concluir que a melhor opção do ponto de vista económico é depositar os resíduos diretamente em aterro, visto que os custos de triagem e reciclagem não conseguem fazer face aos reduzidos preços pagos para se depositar os RCD em aterro. Nos cenários em que é obrigatória a reciclagem de pelo menos 70% dos resíduos, de modo a cumprir o objetivo estipulado pela UE, é reciclada exatamente a quantidade mínima definida, enquanto no cenário base sem obrigatoriedade de reciclagem, apenas 8,4% dos resíduos são processados nas centrais, possibilitando assim a conclusão de que a minimização de custos ocorre com a maioria dos resíduos não sendo reciclados.

Relativamente aos RCD, conclui-se que reciclar o resíduo S1 (betão) é mais rentável do que o resíduo S2 (material indiferenciado), devido à diferença que o custo de processamento destes materiais possui. Esta conclusão torna-se evidente pois quando a produção de RCD é dividida em 30% de S1 e 70% de S2, todo betão produzido é reciclado, enquanto parte de S2 é processada e outra parte é destinada a

aterro. Além disso, quando é feita uma alteração na produção dos resíduos, de modo que a divisão seja igual entre os dois materiais (50% de S1 e 50% de S2), novamente todo o S1 produzido é reciclado, enquanto S2 é destinado a reciclagem e a aterro, acarretando numa redução de 16,4% no custo total.

Pode concluir-se que o custo de deposição em aterro dos materiais é um parâmetro com grande influência no modelo. Como foi citado anteriormente, no cenário em que não existe obrigatoriedade de reciclagem, são tratados apenas 8,4% dos RCD produzidos. Contudo, quando o preço de deposição em aterro dos resíduos é aumentado em 20%, a taxa de reciclagem sobe para 30%, e quando este mesmo custo é duplicado (aumento de 100%), a percentagem de resíduos reciclados é igual a 42,3%, o que corresponde a mais de cinco vezes a percentagem de reciclagem inicial.

Relativamente ao processo de reciclagem HQ (k4), que não existe na AML, é possível concluir que não é economicamente vantajoso instalá-lo, visto que este processo só foi instalado no momento em que foi adicionada uma nova equação que definia que deveria existir no mínimo um processo deste tipo. Além disso, mesmo com a instalação, o processo não recebe nenhum material, de modo que todo material S10 (betão LQ) produzido é vendido.

Por fim, conclui-se que se depender da capacidade autorizada das centrais da AML, existe capacidade suficiente para triar e reciclar todos os resíduos produzidos. O único caso em que são instalados novos processos de triagem incorporada (k2) e reciclagem LQ(k3) foi quando a capacidade pré-existente foi reduzida à 20%. Com isso, o custo de processamento aumentou em 1M€ face ao cenário base, mas a percentagem de capacidade de reciclagem utilizada foi de 77,1%, sendo a maior dentre todos os cenários analisados.

Desenvolvimentos futuros

Os desenvolvimentos futuros deste trabalho podem abordar as limitações do modelo desenvolvido, além das simplificações e pressupostos assumidos.

Relativamente ao fluxo de materiais, seria interessante se fossem consideradas as capacidades de armazenamento das centrais, de modo a limitar a quantidade de RCD que pode ser reciclada ou depositada em aterro nos períodos seguintes à sua produção. Também poderiam ser considerados os RCD perigosos, um tipo de resíduos que precisa de um transporte especial, causando um maior custo de transporte.

Para além da vertente temporal considerada no presente trabalho, de forma que se saiba para cada período a quantidade de RCD produzida, reciclada e depositada em aterro, seria interessante adicionar outra componente temporal, analisando em quanto tempo se consegue triar ou reciclar cada material. De notar que este incremento no modelo necessita de uma complexa recolha de dados.

Por fim, seria interessante implementar uma metodologia semelhante à desenvolvida por Correia (2013), de modo a avaliar os impactes ambientais causados pela rede de reciclagem. A partir da inclusão desta vertente ambiental, é possível analisar o modelo em busca da minimização dos custos ambientais oriundos da GRCD.

Bibliografia

Almeida, J. (2010). A Cost Optimization Model for Hazardous Medical Waste Management in Portugal. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

AlZaghrini, N., Srour, F. J., & Srour, I. (2019). Using GIS and optimization to manage construction and demolition waste: The case of abandoned quarries in Lebanon. *Waste Management*, 95, 139-149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.011>.

Andrade, A.R. (2015). Nova abordagem para a optimização da gestão de resíduos de construção e demolição. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Andrade, A.R., Gomes, M.C., & Duque, J. (2017). New approach for optimization of construction and demolition waste management: Application to the Lisbon metropolitan area. Em: Vaz, A., Almeida, J., Oliveira, J., e Pinto, A. (Editores), *Operational Research, APDIO 2017. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*, vol. 223. Springer, 1-10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71583-4_1

Bernardo, M. (2013). Gestão dos resíduos de construção e demolição: Caracterização, quantificação e processos. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Bernardo, M. Gomes, M.C., & Brito, J. de. (2016). Demolition waste generation for development of a regional management chain model. *Waste Management*, 49, 156-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.027>.

Bragança, L., Mateus, R., & Gouveia, M. (2011). Construção sustentável: o novo paradigma do setor da construção. Universidade do Minho. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/15466>.

Carrola, A.C. (2017). Gestão de Reciclagem dos Resíduos de Construção e Demolição. Agência Portuguesa do Ambiente (APA).

CEWEP (2017). Landfill Taxes and Bans for EU Member States. Disponível em: <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/12/Landfill-taxes-and-bans-overview.pdf>. Acedido a: 15/05/2020.

Coelho, A. (2012). Análise de viabilidade de implantação de centrais de reciclagem de resíduos da construção e demolição em Portugal – Parte III – Análise de viabilidade de uma central de reciclagem. Relatório no âmbito de bolsa de pós-doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

Coelho, A., & de Brito, J. (2010). Análise de viabilidade de implantação de centrais de reciclagem de resíduos da construção e demolição em Portugal – Parte 1: Estimativa da geração de RCD, Relatório ICIST DTC n.º 04/2010.

Coelho, A., & de Brito, J. (2013a). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. *Waste management*, 33(5), 1258-1267. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.025>.

Coelho, A., & de Brito, J. (2013b). Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: location, materials, technology and economic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 39, 338-352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.024>.

Correia, M. (2013). Optimização da gestão de resíduos de construção e demolição. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Correia, M.N., Gomes, M.C., & Duque, J. (2015). Optimization of Construction and Demolition Waste Management: Application to the Lisbon Metropolitan Area. Em: Póvoa, A. e de Miranda J. (Editores), Operations Research and Big Data. Studies in Big Data, vol 15. Springer, 33-40. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24154-8_5.

Decreto-Lei n° 46/2008, de 12 de março de 2008. Regime de gestão de resíduos de construção e demolição. Lisboa.

Decreto-Lei n° 73/2011, de 17 de junho de 2011. Regime de gestão de resíduos de construção e demolição. Lisboa.

Decreto-Lei n°178/2006, de 5 de setembro de 2006. Regime geral de gestão de resíduos. Lisboa.

Deloitte (2017). Study on Resource Efficient Use of Mixed Wastes, Improving management of construction and demolition waste – Final Report. Prepared for the European Commission, DG ENV.

Eurostat (2020a). Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat> (online data code: t_env_wasgt). Acedido a 23 de maio de 2020.

Eurostat (2020b). Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat> (online data code: env_wastrtr). Acedido a 3 de abril de 2020.

Galan, B., Dosal, E., Andrés, A., & Viguri, J. (2013). Optimisation of the construction and demolition waste management facilities location in Cantabria (Spain) under economical and environmental criteria. Waste and Biomass Valorization, 4(4), 797–808. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9196-0>.

Hiete, M., Stengel, J., Ludwig, J., & Schultmann, F. (2011). Matching construction and demolition waste supply to recycling demand: a regional management chain model. Building Research & Information, 39(4), 333-351. DOI: <http://doi.org/10.1080/09613218.2011.576849>.

Huang, B., Wang, X., Kua, H., Geng, Y., Bleischwitz, R., & Ren, J. (2018). Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. Resources, Conservation and Recycling, 129, 36-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029>.

Kartam, N., Al-Mutairi, N., Al-Ghusain, I., & Al-Humoud, J. (2004). Environmental management of construction and demolition waste in Kuwait. Waste management, 24(10), 1049-1059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.06.003>.

Menegaki, M., & Damigos, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 13, 8-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>.

Osmani, M., Glass, J., & Price, A.D.F. (2008). Architects' perspectives on construction waste reduction by design. Waste Management, 28(7), 1147-1158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.05.011>.

PNGR (Plano Nacional da Gestão de Resíduos), 2011. Plano Nacional da Gestão de Resíduos 2011-2020, Lisboa.

PORDATA (2020). Produção de resíduos: total, por sector de atividade económica e por agregados domésticos. Disponível em: <https://www.pordata.pt/Europa/Produ%3%a7%3%a3o+de+res%3%adduos+total++por+sector+de+atividade+econ%3%b3mica+e+por+agregados+dom%3%a9sticos-1378>. Acedido a 3 de abril de 2020.

- Duque, J., Barbosa-Póvoa, A., & Novais, A. (2010). Design and Planning of Sustainable Industrial Networks: Application to a Recovery Network of Residual Products. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(9), 4230-4248. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie900940h>.
- Rocha, T. (2016). Resíduos de construção e demolição como substituto parcial do cimento – efeito na durabilidade em materiais cimentícios. Dissertação para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Materiais e Processos de Construção, Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto.
- Sáez, P.V., & Osmani, M. (2019). A diagnosis of construction and demolition waste generation and recovery practice in the European Union. *Journal of Cleaner Production*, 241, 118400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118400>.
- Santos, M.T., Lamego, P., & Frade, P. (2017). Management Options for Construction and Demolition Wastes from Residential Recuperation. *Waste and Biomass Valorization*, 8(5), 1679-1687. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9675-1>.
- Silva, R.V., de Brito, J., & Dhir, R.K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598-614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>.
- Symonds Group Ltd, ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum (1999). Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts. Report to DGXI, European Commission. Brussels, Belgium.
- Tam, V., & Lu, W. (2016). Construction Waste Management Profiles, Practices, and Performance: A Cross-Jurisdictional Analysis in Four Countries. *Sustainability*, 8(2), 190. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8020190>.
- Wu, H., Zuo, J., Zillante, G., Wang, J., & Yuan, H. (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118163>.
- Xu, J., Shi, Y., & Zhao, S. (2019). Reverse Logistics Network-Based Multiperiod Optimization for Construction and Demolition Waste Disposal. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2), 0418124. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001592](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001592).

Anexos

Anexo I – Produção de resíduos nos países da UE (Eurostat, 2020a)

Tabela 44 – Anexo I: Produção de resíduos nos países da UE (Eurostat, 2020a)

	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
UE-28	2.547	2.567	2.427	2.454	2.484	2.507	2.537
Alemanha	364,0	363,8	372,8	363,5	368,0	387,5	400,1
Áustria	53,0	54,3	56,3	46,8	48,0	55,9	61,2
Bélgica	52,8*	59,4*	48,6	61,3	53,8	58,0	63,2
Bulgária	201,0	162,9	167,6	167,4	161,3	179,7	120,5
Chipre	2,2	1,2	1,8	2,4	1,9	2,0	2,5
Croácia	7,2	5,4	4,2	3,2	3,4	3,7	5,3
Dinamarca	12,6	14,7	15,2	16,2	16,7	20,8	21,0
Eslováquia	10,7	14,5	11,5	9,4	8,4	8,9	10,6
Eslovénia	5,8	6,0	5,0	6,0	4,5	4,7	5,5
Espanha	160,7	160,9	149,3	137,5	118,6	110,5	129,0
Estónia	20,9	18,9	20,0	19,0	22,0	21,8	24,3
Finlândia	69,7	72,2	81,8	104,3	91,8	96,0	122,9
França	296,6*	312,3*	345,0	355,1	344,7	324,5	323,5
Grécia	33,3	51,3	68,6	70,4	72,3	69,8	72,4
Hungria	24,7*	22,3*	16,9*	16,7	16,3	16,7	15,9
Irlanda	24,5*	29,6*	22,5	19,8	12,7	15,2	15,3
Itália	139,8	155,0	179,3	158,6	154,4	157,9	164,0
Letónia	1,3	1,9	1,5	1,5	2,3	2,6	2,5
Lituânia	7,0	6,4	6,3	5,6	5,7	6,2	6,6
Luxemburgo	8,3	8,4	9,6	10,4	8,4	7,1	10,1
Malta	3,1*	2,9*	2,1*	1,4	1,5	1,7	2,0
Países Baixos	92,4	99,2	102,6	121,1	121,2	132,4	141,0
Polónia	137,5	153,6	139,0	158,7	162,4	179,2	182,0
Portugal	29,3*	35,0*	16,9	13,6	13,4	14,4	14,7
Reino Unido	298,8	291,1	282,2	241,8	241,7	263,3	277,3
República Checa	29,3	24,7	25,4	23,8	23,2	23,4	25,4
Romênia	369,3*	344,4	189,1	201,4	249,4	176,6	177,6
Suécia	91,8	95,0	86,2	117,6	156,3	167,0	141,6

A simbologia (*) refere-se a valores estimados.

Anexo II – Percentagem de tratamento dos resíduos da UE-28 em 2016 (Eurostat, 2020b)

Tabela 45 – Anexo II: Percentagem de tratamento dos resíduos da UE-28 em 2016 (Eurostat, 2020b)

	Aterro	Incineração	Energia	Reciclagem	Enchimento
UE-28	45,7	1,0	5,6	37,8	9,9
Alemanha	18,1	1,2	11,3	42,7	26,6
Áustria	45,9	6,1	0,0	37,0	11,0
Bélgica	6,4	4,1	12,6	76,9	0,0
Bulgária	94,4	0,0	0,4	5,2	0,0
Chipre	57,8	0,0	3,8	10,4	28,0
Croácia	47,8	0,0	1,0	47,2	4,0
Dinamarca	29,1	0,0	19,5	51,4	0,0
Eslováquia	47,8	0,5	7,0	40,0	4,7
Eslovénia	6,9	0,8	4,8	60,2	27,2
Espanha	53,6	0,0	3,6	37,1	5,7
Estónia	64,7	0,0	2,5	21,6	11,2
Finlândia	88,0	0,0	4,5	7,4	0,0
França	27,6	1,6	5,4	55,0	10,3
Grécia	94,8	0,0	0,3	4,8	0,0
Hungria	34,2	0,6	7,4	54,1	3,7
Irlanda	38,4	0,3	4,8	10,6	46,0
Itália	14,2	2,7	4,0	78,9	0,1
Letónia	20,3	0,0	6,8	71,7	1,1
Lituânia	56,6	0,0	5,8	33,4	4,1
Luxemburgo	39,0	0,0	2,1	34,8	24,2
Malta	17,2	0,4	0,0	19,1	63,4
Países Baixos	46,0	0,9	7,6	45,6	0,0
Polónia	28,0	0,4	3,3	46,2	22,2
Portugal	34,7	0,2	12,1	43,5	9,5
Reino Unido	37,5	2,7	3,4	48,5	7,8
República Checa	16,6	0,4	4,5	49,5	29,0
Romênia	94,1	0,1	1,4	4,0	0,4
Suécia	76,3	0,2	6,6	12,0	4,9

Anexo III – Classificação dos RCD de acordo com a LER (Segundo Correia, 2013)

Tabela 46 – Anexo III: Classificação dos RCD de acordo com a LER (Segundo Correia, 2013)

Código	Descrição
17	Resíduos de construção e demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados)
17 01	Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 01 01	Betão
17 01 02	Tijolos
17 01 03	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos
17 01 06 (*)	Misturas ou frações separadas de betão, tijolos, ladrilhas, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas
17 01 07	Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidos em 17 01 06
17 02	Madeira, vidro e plástico
17 02 01	Madeira
17 02 02	Vidro
17 02 03	Plástico
17 02 04 (*)	Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas
17 03	Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão
17 03 01 (*)	Misturas betuminosas contendo alcatrão
17 03 02	Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01
17 03 03 (*)	Alcatrão e produtos de alcatrão
17 04	Metais (incluindo ligas)
17 04 01	Cobre, bronze e latão
17 04 02	Alumínio
17 04 03	Chumbo
17 04 04	Zinco
17 04 05	Ferro e aço
17 04 06	Estanho
17 04 07	Mistura de metais
17 04 09 (*)	Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas
17 04 10 (*)	Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas
17 04 11	Cabos não abrangidos em 17 04 10
17 05	Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem
17 05 03 (*)	Solos e rochas contendo substâncias perigosas
17 05 04	Solos e rochas não abrangidos 17 05 03
17 05 05 (*)	Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas
17 05 06	Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05
17 05 07 (*)	Balastos de linhas de caminho de ferro contendo substâncias perigosas
17 05 08	Balastos de linhas de caminho de ferro não abrangidos em 17 05 07
17 06	Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto
17 06 01 (*)	Materiais de isolamento contendo amianto
17 06 03 (*)	Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas
17 06 04	Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03
17 06 05 (*)	Materiais de construção contendo amianto
17 08	Materiais de construção à base de gesso
17 08 01 (*)	Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas
17 08 02	Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01
17 09	Outros resíduos de construção e demolição
17 09 01 (*)	Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio
17 09 02 (*)	Resíduos de construção e demolição contendo PCB (por exemplo, vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de
17 09 03 (*)	Outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas de resíduos) contendo substâncias perigosas
17 09 04	Mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03

A simbologia (*) refere-se a resíduos classificados como perigoso

Anexo IV – Cálculos da Matriz de Transformação

Neste anexo são demonstrados como foram feitos os cálculos para a criação da matriz de transformação (tabela 13 da secção 4.2.2). As percentagens base dos materiais S5, S6, S7 e S8 são baseados em Coelho & de Brito (2010), e são apresentadas na tabela 14.

Tabela 47 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a triagem (k1)

Processo	Input	Output						
		S3	S4	S5	S6	S7	S8	MR1
Triagem (k1)	S1	0,8427		0,0249	0,0249	0,0024	0,0051	0,1
	S2		0,7427	0,0249	0,0249	0,0024	0,0051	0,2
	Cálculo	(*)	(*)	30% de 8,3%	30% de 8,3%	30% de 0,8%	30% de 1,7%	Andrade (2015)

(*): as percentagens de S3 e S4 são: 100% - %(S5, S6, S7, S8 e MR1).

Tabela 48 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a triagem incorporada (k2)

Processo	Input	Output						
		S3	S4	S5	S6	S7	S8	MR1
Triagem Incorporada (k2)	S1	0,8427		0,0249	0,0249	0,0024	0,0051	0,10
	S2		0,6927	0,0249	0,0249	0,0024	0,0051	0,25
	Cálculo	(*)	(*)	30% de 8,3%	30% de 8,3%	30% de 0,8%	30% de 1,7%	Andrade (2015)

(*): as percentagens de S3 e S4 são: 100% - %(S5, S6, S7, S8 e MR1).

Tabela 49 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a reciclagem LQ (k3)

Processo	Input	Output						
		S5	S6	S7	S8	S9	S10	MR2
Reciclagem LQ (k3)	S3	0,0332	0,0249	0,0024	0,0051		0,8344	0,1
	S4	0,0332	0,0249	0,0024	0,0051	0,8344		0,1
	Cálculo	40% de 8,3%	30% de 8,3%	30% de 0,8%	30% de 1,7%	(*)	(*)	Andrade (2015)

(*): as percentagens de S9 e S10 são: 100% - %(S5, S6, S7, S8 e MR2).

Tabela 50 – Anexo IV: Cálculo da matriz de transformação para a reciclagem HQ (k4)

Processo	Input	Output					
		S5	S6	S7	S8	S11	MR2
Reciclagem HQ (k4)	S10	0,0249	0,0332	0,0032	0,0068	0,8319	0,1
	Cálculo	30% de 8,3%	40% de 8,3%	40% de 0,8%	40% de 1,7%	(*)	Andrade (2015)

(*): a percentagem de S11 é: 100% - %(S5, S6, S7, S8 e MR2).

Anexo V – Empresas de GRCD na AML

Tabela 51 – Anexo V: Centrais de triagem e reciclagem encontradas na AML

Empresa	Tipo	Freguesia	Incluído no Modelo
Bucelbritas	Reciclagem	Bucelas	Sim
Citri	Reciclagem	Sado	Sim
Renascimento	Reciclagem	Sto. Antão do Tojal	Sim
Sanestradas	Reciclagem	S. Domingos de Rana	Sim
SGR	Reciclagem	Paio Pires	Sim
Soarvamil	Reciclagem	Corroios	Sim
Transucatas	Reciclagem	Paio Pires	Sim
Ambides	Triagem	Terrugem	Sim
Ambitrena	Triagem	Sado	Sim
Asocorsul	Triagem	Sto. Antão do Tojal	Sim
BGR	Triagem	São João da Talha	Sim
Carmona	Triagem	Barreiro	Sim
Correia Correia	Triagem	Venda do Pinheiro	Sim
Gândara	Triagem	São Marcos	Sim
Jorge F. de Almeida	Triagem	Pêro Pinheiro	Sim
Jorge M. e Camacho	Triagem	Palmela	Sim
José M. Ferreira	Triagem	S. Domingos de Rana	Sim
Quima	Triagem	Sado	Sim
Resotrans	Triagem	S. António dos Cavaleiros	Sim

As empresas que possuem capacidades autorizadas muito reduzidas não foram consideradas no modelo. O mesmo acontece com as centrais para as quais não foi possível encontrar o alvará.

Anexo VI – Cálculo dos Custos de Processamento dos RCD

As duas primeiras tabelas deste anexo são referentes às centrais que foram consideradas no modelo e as respectivas capacidades autorizadas (ton/ano). Nas centrais de reciclagem estão listadas todas as empresas que foram encontradas na AML, enquanto nas centrais de triagem foram consideradas apenas as instalações com capacidade mínima de 15.000 toneladas por ano.

Tabela 52 – Anexo VI: Capacidades autorizadas das centrais de reciclagem

Centrais de Reciclagem	Capacidades autorizadas (ton/ano)
Bucelbritas	230.000
Citri	150.000
Renascimento	200.000
Sanestradas	139.000
SGR	100.000
Soarvamil	134.200
Transucatas	196.000
Média	164.171
20%	32.834

Tabela 53 – Anexo VI: Capacidades autorizadas das centrais de triagem

Centrais de Triagem	Capacidades autorizadas (ton/ano)
Ambides	40.000
Ambitrena	15.000
Asocorsul	15.000
BGR	100.000
Carmona	40.000
Correia Correia	70.080
Gândara	39.300
Jorge F. de Almeida	64.800
Jorge M. e Camacho	34.500
José M. Ferreira	32.110
Quima	313.995
Resotrans	35.000
Média	66.649
40%	26.660

As próximas 4 tabelas apresentam os cálculos feitos para saber o custo de processamento em € por tonelada em cada central. Os custos anuais dos equipamentos, da manutenção, da energia e da mão-de-obra são de Coelho (2012). As capacidades utilizadas são retiradas dos alvarás das empresas.

Tabela 54 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário do processo na central de triagem

Central de Triagem	Custo (€/ano)		
	Equipamento	Manutenção	Energia
Báscula	639	134	6,84
Escavadora	6.750	4.486	12.312
Alimentador vibratório	14.250	1.117	2.216
Trituração (martelos/tesouras)	6.000	1.670	12.996
Cabine de separação manual	242	51	38
	27.881	7.458	27.569
Total	62.908		
Mão-de-obra	26.693		
Total (€/ton)	$(62.908 + 26.693) / 26.660 = 3,36$		

Tabela 55 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário da triagem incorporada

Triagem incorporada	Custo (€/ano)		
	Equipamento	Manutenção	Energia
Báscula	639	134	6,84
Escavadora	6.750	4.486	12.312
Alimentador vibratório	14.250	1.117	2.216
Cabine de separação manual	242	51	38
	21.881	5.788	14.573
Total	42.242		
Mão-de-obra	39.069,55		
Total (€/ton)	$(42.242 + 39.069,55) / 32.834 = 2,48$		

Tabela 56 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário da reciclagem LQ

Central de reciclagem LQ	Custo (€/ano)		
	Equipamento	Manutenção	Energia
Mesa vibratória	13.721	1.037	2.531
Magnete	3.168	257	889
Britadeira	13.000	1.183	15.048
	29.889	2.477	18.468
Total	50.834		
Mão-de-obra	16.744,09		
Total (€/ton)	$(50.834 + 16.744,09) / 32.834 = 2,06$		

Tabela 57 – Anexo VI: Cálculo do custo unitário da reciclagem HQ

Central de reciclagem HQ	Custo (€/ano)		
	Equipamento	Manutenção	Energia
Mesa vibratória 1	13.721	1.037	2.530,8
Magnete	3.168	257	889,2
Britadeira	13.000	1.183	15.048
Separador de ar	5.000	3.888	861,84
Gerador corrente “eddy”	6.541	257	2.243,52
Mesa vibratória 2	13.721	1.037	3.050,64
Separador a ar pulsante	34.417	8.165	17.373,6
Espirais	3.346	651	3.693,6
	92.914	16.475	45.691
Total	155.080		
Mão-de-obra	16.744,09		
Total (€/ton)	$(155.080 + 16.744,09) / (32.834 * 0,5) = 10,47$		

Nota: de modo semelhante a Andrade (2015), foi considerado que o fluxo de entrada neste processo é 50% do que entra na reciclagem LQ.

Anexo VII – Conjunto de materiais de entrada e saída dos processos

A **tabela 48** apresenta as correspondências utilizadas nos conjuntos $Iks_{k,s}$ e $Oks_{k,s}$, referente aos materiais que entram e saem em cada um dos processos.

Tabela 58 – Anexo VII: Correspondências de materiais de entrada e saída dos processos

Materiais s de entrada nos processos k		Materiais s de saída dos processos k					
Processo	Entrada	Processo	Saída	Processo	Saída	Processo	Saída
k0	s1	k0	s1	k2	s6	k4	s6
k0	s2	k0	s2	k2	s7	k4	s7
k1	s1	k1	s3	k2	s8	k4	s8
k1	s2	k1	s4	k2	MR1	k4	s11
k2	s1	k1	s5	k2	MR2	k4	MR2
k2	s2	k1	s6	k3	s5	k5	s12
k3	s3	k1	s7	k3	s6		
k3	s4	k1	s8	k3	s7		
k4	s10	k1	MR1	k3	s8		
k5	s1	k1	MR2	k3	s9		
k5	s2	k2	s3	k3	s10		
k5	MR1	k2	s4	k3	MR2		

Anexo VIII – Freguesias da AML

Tabela 59 – Anexo VIII: Freguesias da AML e seus nós

Nó	Freguesia	Nó	Freguesia	Nó	Freguesia
i1	Sesimbra (Santiago)	i72	Lapa	i143	Pontinha
i2	Sado	i73	Mercês	i144	Ameixoeira
i3	Setúbal (Nossa Senhora da Anunciada)	i74	Caxias	i145	Charneca
i4	Setúbal (São Julião)	i75	Algés	i146	Prior Velho
i5	Setúbal (Santa Maria da Graça)	i76	São Vicente de Fora	i147	São Brás
i6	Setúbal (São Sebastião)	i77	Santo Isidro de Pegões	i148	Rio de Mouro
i7	São Simão	i78	Cruz Quebrada-Dafundo	i149	Olival de Basto
i8	Gâmbia-Pontes-Alto da Guerra	i79	Socorro	i150	Sintra (São Pedro de Penaferrim)
i9	Sesimbra (Castelo)	i80	Santa Justa	i151	Odivelas
i10	São Lourenço	i81	São Francisco Xavier	i152	Sacavém
i11	Quinta do Conde	i82	Graça	i153	Póvoa de Santo Adrião
i12	Fernão ferro	i83	Linda-A-Velha	i154	Famões
i13	Coina	i84	Santa Engrácia	i155	camarate
i14	Palmela	i85	São José	i156	Casal de Cambra
i15	Palhais	i86	Santo Condestável	i157	Ramada
i16	Quinta do Anjo	i87	Santa Isabel	i158	Bobadela
i17	Arrentela	i88	São Mamede	i159	Belas
i18	Santo António da Charneca	i89	Ajuda	i160	Apelação
i19	Aldeia de Paio Pires	i90	Alcântara	i161	Santo António dos Cavaleiros
i20	Charneca de Caparica	i91	Montijo	i162	Alcochete
i21	Santo André	i92	Pena	i163	Algueirão-Mem Martins
i22	Vale da Amoreira	i93	Coração de Jesus	i164	Caneças
i23	Seixal	i94	Anjos	i165	Sinta (Santa Maria e São Miguel)
i24	Corroios	i95	Queijas	i166	Frielas
i25	Amora	i96	Estoril	i167	Unhos
i26	Verderena	i97	Penha de França	i168	São João da Talha
i27	Marateca	i98	São Jorge de Arroios	i169	Sintra (São Martinho)
i28	Alto do Seixalinho	i99	Samouco	i170	Canha
i29	Sobreda	i100	São Sebastião da Pedreira	i171	Colares
i30	Costa da Caparica	i101	São João	i172	Santa Iria de Azoia
i31	Feijó	i102	Poceirão	i173	Pêro Príncipe

i32	Laranjeiro	i103	Carnaxide	i174	Póvoa de Santa iria
i33	Barreiro	i104	Campolide	i175	Loures
i34	Moita	i105	Beato	i176	Santo Antão do Tojal
i35	Trafaria	i106	São Francisco	i177	Forte da Casa
i36	Pinhal Novo	i107	Cascais	i178	Montelavar
i37	Cova da Piedade	i108	Alfragide	i179	São Julião do Tojal
i38	Caparica	i109	São João de Deus	i180	Almargem do Bispo
i39	Pragal	i110	Alto do Pina	i181	Terrugem
i40	Baixa da Banheira	i111	Buraca	i182	Vialonga
i41	Alhos Vedros	i112	Nossa Senhora de Fátima	i183	Fanhões
i42	Almada	i113	Alvalade	i184	Lousa
i43	Cacilhas	i114	Damaia	i185	Santo Estêvão das Galés
i44	Lavradio	i115	Porto Salvo	i186	Cheleiros
i45	Alto-Estanqueiro-Jardia	i116	Barcarena	i187	Sobralinho
i46	Gaio-Rosário	i117	São Domingos de Rana	i188	São João das Lampas
i47	Sarilhos Pequenos	i118	São Domingos de Benfica	i189	Alverca do Ribatejo
i48	Sarilhos Grandes	i119	Reboleira	i190	Alhandra
i49	Afonsoeiro	i120	Benfica	i191	Bucelas
i50	Santa Maria de Belém	i121	Venda Nova	i192	São Miguel de Alcainça
i51	Parede	i122	Campo Grande	i193	Igreja Nova
i52	Carcavelos	i123	Marvila	i194	Calhandriz
i53	São Paulo	i124	Venteira	i195	Malveira
i54	Mártires	i125	São João de Brito	i196	Venda do Pinheiro
i55	Sé	i126	Massamá	i197	Milharado
i56	Santos-O-Velho	i127	Falagueira	i198	Carvoeira
i57	Madalena	i128	São Marcos	i199	São João dos Montes
i58	Pegões	i129	Monte Abraão	i200	Gradil
i59	São Miguel	i130	Queluz	i201	Ericeira
i60	São Nicolau	i131	Alcabideche	i202	Vila Franca do Rosário
i61	Sacramento	i132	Alfornelos	i203	Mafra
i62	Santo Estêvão	i133	Carnide	i204	Castanheira do Ribatejo
i63	Santiago	i134	Mina	i205	Cachoeiras
i64	Atalaia	i135	Cacém	i206	Sobral da Abelheira
i65	castelo	i136	Moscavide	i207	Enxara do Bispo
i66	Oeiras e São Julião da Barra	i137	Brandoa	i208	Santo Isidoro
i67	São Cristóvão e São Lourenço	i138	Lumiar	i209	Vila Franca de Xira
i68	Encarnação	i139	Santa Maria dos Olivais	i210	Azueira
i69	Paço de Arcos	i140	Agualva	i211	Encarnação
i70	Prazeres	i141	Portela		
i71	Santa Catarina	i142	Mira-Sintra		

Anexo IX – Produção de RCD por freguesia

Tabela 60 – Anexo IX: Produção de RCD por freguesia (Segundo Bernardo (2013))

Nó	Geração total média (ton)	S1	S2	Nó	Geração total média (ton)	S1	S2
i1	425	127,5	297,5	i107	2.436	730,8	1.705,2
i2	85	25,5	59,5	i108	182	54,6	127,4
i3	1.020	306	714	i109	1.276	382,8	893,2
i4	2.656	796,8	1.859,2	i110	4.503	1.350,9	3.152,1
i5	2.240	672	1.568	i111	259	77,7	181,3
i6	5.362	1.608,6	3.753,4	i112	15.383	4.614,9	10.768,1
i7	187	56,1	130,9	i113	2.795	838,5	1.956,5
i8	235	70,5	164,5	i114	2.333	699,9	1.633,1
i9	892	267,6	624,4	i115	37	11,1	25,9
i10	244	73,2	170,8	i116	1.259	377,7	881,3
i11	221	66,3	154,7	i117	2.019	605,7	1.413,3
i12	176	52,8	123,2	i118	9.528	2.858,4	6.669,6
i13	2.087	626,1	1.460,9	i119	37	11,1	25,9
i14	805	241,5	563,5	i120	5.919	1.775,7	4.143,3
i15	85	25,5	59,5	i121	735	220,5	514,5
i16	1.140	342	798	i122	3.233	969,9	2.263,1
i17	1.507	452,1	1.054,9	i123	11.707	3.512,1	8.194,9
i18	1.313	393,9	919,1	i124	1.178	353,4	824,6
i19	548	164,4	383,6	i125	16.199	4.859,7	11.339,3
i20	579	173,7	405,3	i126	309	92,7	216,3
i21	645	193,5	451,5	i127	1.269	380,7	888,3
i22	75	22,5	52,5	i128	730	219	511
i23	548	164,4	383,6	i129	69	20,7	48,3
i24	2.359	707,7	1.651,3	i130	587	176,1	410,9
i25	2.041	612,3	1.428,7	i131	2.457	737,1	1.719,9
i26	2.011	603,3	1.407,7	i132	12	3,6	8,4
i27	643	192,9	450,1	i133	4.557	1.367,1	3.189,9
i28	708	212,4	495,6	i134	846	253,8	592,2
i29	341	102,3	238,7	i135	1.512	453,6	1.058,4
i30	1.403	420,9	982,1	i136	3.432	1.029,6	2.402,4
i31	2.302	690,6	1.611,4	i137	1.920	576	1.344
i32	1.966	589,8	1.376,2	i138	11.550	3.465	8.085
i33	3.920	1.176	2.744	i139	7.006	2.101,8	4.904,2
i34	786	235,8	550,2	i140	9.717	2.915,1	6.801,9
i35	1.671	501,3	1.169,7	i141	0	0	0
i36	2.208	662,4	1.545,6	i142	523	156,9	366,1
i37	1.429	428,7	1.000,3	i143	3.127	938,1	2.188,9
i38	3.956	1.186,8	2.769,2	i144	1.146	343,8	802,2
i39	2.485	745,5	1.739,5	i145	773	231,9	541,1
i40	1.294	388,2	905,8	i146	169	50,7	118,3

i41	1.759	527,7	1.231,3
i42	3.590	1.077	2.513
i43	1.362	408,6	953,4
i44	2.652	795,6	1.856,4
i45	323	96,9	226,1
i46	222	66,6	155,4
i47	435	130,5	304,5
i48	399	119,7	279,3
i49	409	122,7	286,3
i50	5.860	1.758	4.102
i51	2.126	637,8	1.488,2
i52	1.067	320,1	746,9
i53	9.053	2.715,9	6.337,1
i54	3.452	1.035,6	2.416,4
i55	1.148	344,4	803,6
i56	5.940	1.782	4.158
i57	1.491	447,3	1.043,7
i58	108	32,4	75,6
i59	10.989	3.296,7	7.692,3
i60	8.002	2.400,6	5.601,4
i61	699	209,7	489,3
i62	4.890	1.467	3.423
i63	2.665	799,5	1.865,5
i64	46	13,8	32,2
i65	2.803	840,9	1.962,1
i66	307	92,1	214,9
i67	4.152	1.245,6	2.906,4
i68	2.839	851,7	1.987,3
i69	426	127,8	298,2
i70	10.066	3.019,8	7.046,2
i71	7.660	2.298	5.362
i72	6.089	1.826,7	4.262,3
i73	1.628	488,4	1.139,6
i74	502	150,6	351,4
i75	1.933	579,9	1.353,1
i76	5.782	1.734,6	4.047,4
i77	49	14,7	34,3
i78	813	243,9	569,1
i79	2.679	803,7	1.875,3
i80	5.788	1.736,4	4.051,6
i81	1.903	570,9	1.332,1
i82	9.375	2.812,5	6.562,5
i83	355	106,5	248,5
i84	9.636	2.890,8	6.745,2
i85	4.457	1.337,1	3.119,9
i86	15.441	4.632,3	10.808,7

i147	2.102	630,6	1.471,4
i148	16.175	4.852,5	11.322,5
i149	589	176,7	412,3
i150	2.320	696	1.624
i151	1.844	553,2	1.290,8
i152	2.636	790,8	1.845,2
i153	1.340	402	938
i154	330	99	231
i155	2.620	786	1.834
i156	2.347	704,1	1.642,9
i157	856	256,8	599,2
i158	36	10,8	25,2
i159	133	39,9	93,1
i160	0	0	0
i161	189	56,7	132,3
i162	2.117	635,1	1.481,9
i163	17.651	5.295,3	12.355,7
i164	1.079	323,7	755,3
i165	1.345	403,5	941,5
i166	187	56,1	130,9
i167	452	135,6	316,4
i168	623	186,9	436,1
i169	287	86,1	200,9
i170	147	44,1	102,9
i171	5.448	1.634,4	3.813,6
i172	1.279	383,7	895,3
i173	535	160,5	374,5
i174	1.483	444,9	1.038,1
i175	759	227,7	531,3
i176	534	160,2	373,8
i177	29	8,7	20,3
i178	576	172,8	403,2
i179	676	202,8	473,2
i180	1.755	526,5	1.228,5
i181	1.058	317,4	740,6
i182	361	108,3	252,7
i183	16	4,8	11,2
i184	228	68,4	159,6
i185	189	56,7	132,3
i186	969	290,7	678,3
i187	90	27	63
i188	2.053	615,9	1.437,1
i189	2.513	753,9	1.759,1
i190	925	277,5	647,5
i191	141	42,3	98,7
i192	34	10,2	23,8

i87	23.376	7.012,8	16.363,2
i88	2.376	712,8	1.663,2
i89	6.145	1.843,5	4.301,5
i90	11.565	3.469,5	8.095,5
i91	6.719	2.015,7	4.703,3
i92	9.345	2.803,5	6.541,5
i93	769	230,7	538,3
i94	11.251	3.375,3	7.875,7
i95	185	55,5	129,5
i96	1.763	528,9	1.234,1
i97	4.783	1.434,9	3.348,1
i98	14.936	4.480,8	10.455,2
i99	266	79,8	186,2
i100	3.132	939,6	2.192,4
i101	6.815	2.044,5	4.770,5
i102	1.280	384	896
i103	622	186,6	435,4
i104	19.245	5.773,5	13.471,5
i105	11.419	3.425,7	7.993,3
i106	706	211,8	494,2

i193	6.383	1.914,9	4.468,1
i194	36	10,8	25,2
i195	4.421	1.326,3	3.094,7
i196	1.069	320,7	748,3
i197	925	277,5	647,5
i198	496	148,8	347,2
i199	456	136,8	319,2
i200	1.308	392,4	915,6
i201	3.008	902,4	2.105,6
i202	325	97,5	227,5
i203	3.108	932,4	2.175,6
i204	919	275,7	643,3
i205	201	60,3	140,7
i206	12	3,6	8,4
i207	958	287,4	670,6
i208	412	123,6	288,4
i209	5.514	1.654,2	3.859,8
i210	47	14,1	32,9
i211	1.492	447,6	1.044,4

Anexo X – Matriz de transformação de Andrade (2015)

Tabela 61 – Matriz de transformação de Andrade (2015)

		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	MR2	MR1
Central de triagem	k1.S1			0,8427		0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0	0,1
	k1.S2				0,6927	0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0,05	0,2
	k1.S3														
	k1.S4														
Triagem incorporada	k2.S1			0,8427		0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0	0,1
	k2.S2				0,6427	0,0249	0,0249	0,0024	0,0051					0,05	0,25
	k2.S3														
	k2.S4														
Reciclagem LQ	k3.S1														
	k3.S2														
	k3.S3					0,0332	0,0249	0,0249	0,0051		0,8619			0,1	
	k3.S4					0,0332	0,0249	0,0249	0,0051	0,8619				0,1	
Reciclagem HQ	k4.S1														
	k4.S2														
	k4.S3														
	k4.S4														
	K4.S10					0,0249	0,0249	0,0024	0,0051			0,8427		0,1	
Aterro	k5.MR1												1		
	k5.MR2												1		
	k5.S1												1		
	k5.S2												1		

Anexo XI – Resultados do modelo reduzido

Tabela 62 – Anexo XI: Fluxo de materiais (em toneladas) e capacidade utilizada do cenário base do modelo reduzido

Material	Processo	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
S1	k2	142,11	139,05	167,46	176,80	176,62	281,21	111,83	128,80	285,04	700,38	1.392,79	345,51
S2	k2	216,39	219,45	191,04	181,70	181,88	1.631,17	246,67	229,70	73,46	1.193,72	308,71	722,91
S2	k5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	432,95	0,00	0,00	333,35	1.254,33	1.568,74	458,24
S3	k3	119,76	117,18	141,12	148,99	148,84	236,98	94,24	108,54	240,20	590,21	1.173,70	291,16
S4	k3	149,89	152,01	132,33	125,87	125,99	1.129,91	170,87	159,11	50,89	826,89	213,84	500,76
MR1	k5	68,31	68,77	64,51	63,11	63,13	435,91	72,85	70,30	46,87	368,47	216,46	215,28
MR2	k5	26,96	26,92	27,35	27,49	27,48	136,69	26,51	26,77	29,11	141,71	138,75	79,19
Capacidade	Média	83,4%	83,3%	83,9%	84,1%	84,1%	36,1%	6,9%	6,9%	7,1%	36,4%	34,0%	20,5%

Tabela 63 – Anexo XI: Fluxo de materiais (em toneladas) e capacidade utilizada do cenário comparativo do modelo reduzido

Material	Processo	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
S1	k5	58,80	19,23	11,01	0,00	0,00	0,00	514,38	19,10	1090,78	952,05	0,00	1382,25
S2	k5	0,00	0,00	0,00	688,74	341,63	341,63	1582,05	0,00	138,07	2748,07	1702,70	1901,51
Capacidade	Média	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 64 – Anexo XI: Fluxo de materiais (em toneladas) e capacidade utilizada no cenário livre do modelo reduzido

	Material	Processo	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
<i>X_{rec} = 0</i>	S1	k2	0,00	137,59	224,24	78,79	146,41	246,67	0,00	171,61	246,67	246,67	246,67	246,67
	S1	k5	25,92	0,00	0,00	0,00	147,16	56,29	513,02	6,57	651,40	0,00	8,88	646,36
	S2	k5	0,00	0,00	0,00	510,76	0,00	0,00	1342,49	2055,26	595,52	2576,03	1002,16	1362,19
	S3	k3	0,00	115,95	188,97	66,40	123,38	207,87	0,00	144,62	207,87	207,87	207,87	207,87
	MR1	k5	0,00	13,76	22,42	7,88	14,64	24,67	0,00	17,16	24,67	24,67	24,67	24,67
	MR2	k5	0,00	11,59	18,90	6,64	12,34	20,79	0,00	14,46	20,79	20,79	20,79	20,79
	Capacidade	média	0,0%	33,7%	55,0%	19,3%	35,9%	60,5%	0,0%	42,1%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%
<i>X_{rec} = 1</i>	S1	k1	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33	33,33
	S1	k2	58,31	0,00	267,87	51,36	209,52	389,53	327,72	569,24	837,77	246,67	114,17	575,47
	S2	k2	306,35	525,66	383,42	323,78	242,74	1026,39	351,39	1147,15	400,99	1163,03	456,36	3117,14
	S3	k3	77,23	28,09	253,82	71,37	204,65	356,35	304,26	507,78	734,08	235,96	124,30	513,04
	S4	k3	212,21	364,12	265,59	224,28	168,14	710,98	243,41	794,63	277,77	805,63	316,12	2159,25
	MR1	k5	85,75	134,75	125,97	89,41	84,97	298,88	123,95	347,04	187,36	318,76	128,84	840,17
	MR2	k5	28,94	39,22	51,94	29,57	37,28	106,73	54,77	130,24	101,18	104,16	44,04	267,23
	Capacidade	média	7,6%	10,5%	13,2%	7,7%	9,4%	27,7%	13,9%	33,6%	25,1%	27,3%	11,5%	70,4%

Anexo XII – Resultados do modelo completo

Tabela 65 – Anexo XII: Fluxo de materiais (em kton) e capacidade utilizada no cenário A

Material	Processo	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
S1	k1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,02	0,02	0,00	0,06	0,04	0,03
S1	k2	5,69	5,17	5,56	8,86	16,69	29,90	16,88	6,12	18,33	19,76	26,39	19,56
S2	k2	11,39	17,47	16,19	17,79	19,83	17,28	26,97	22,35	14,86	25,01	23,33	26,54
S2	k5	0,00	1,55	2,83	6,99	1,93	4,14	24,72	4,57	25,19	23,73	31,23	52,38
S3	k3	4,80	4,36	4,68	7,47	14,07	25,34	14,24	5,18	15,44	16,70	22,27	16,51
S4	k3	7,89	12,10	11,22	12,32	13,74	11,97	18,68	15,48	10,29	17,33	16,16	18,39
MR1	k5	3,42	4,89	4,60	5,33	6,63	7,33	8,43	6,20	5,55	8,24	8,48	8,60
MR2	k5	1,27	1,65	1,59	1,98	2,78	3,73	3,29	2,07	2,57	3,40	3,84	3,49
Capacidade	Média	11,9%	15,6%	15,0%	18,5%	25,8%	34,1%	30,7%	19,6%	23,7%	31,6%	35,4%	32,4%

Tabela 66 – Anexo XII: Fluxo de materiais (em kton) e capacidade utilizada no cenário B

Material	Processo	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
S1	k1	0,01	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28
S1	k2	0,31	0,29	2,80	1,53	1,08	1,81	2,44	3,00	4,84	2,23	5,63	23,70
S1	k5	0,15	0,14	1,07	3,44	3,11	5,61	10,25	11,76	12,56	19,71	23,65	37,81
S2	k5	0,00	0,50	3,12	1,00	4,39	24,26	10,98	23,75	142,42	34,70	45,38	127,80
S3	k3	0,27	0,24	2,40	1,29	0,91	1,53	2,05	2,53	4,08	1,88	4,74	20,21
MR1	k5	0,03	0,03	0,29	0,15	0,11	0,18	0,24	0,30	0,48	0,22	0,56	2,40
MR2	k5	0,03	0,02	0,24	0,13	0,09	0,15	0,21	0,25	0,41	0,19	0,47	2,02
Capacidade	Média	0,2%	0,2%	2,1%	1,1%	0,8%	1,4%	1,8%	2,2%	3,6%	1,7%	4,2%	17,9%

Tabela 67 – Anexo XII: Fluxo de materiais (em kton) e capacidade utilizada no cenário D

Material	Processo	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t12
S1	k1	0,01	0,05	0,00	0,04	0,07	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33
S1	k2	9,37	12,17	16,92	15,52	19,37	32,31	33,27	22,99	28,16	29,93	33,92	44,27
S2	k2	4,05	3,35	4,30	3,53	5,66	9,44	14,08	18,79	14,69	11,85	18,87	10,90
S2	k5	0,00	0,38	3,58	1,77	1,92	2,32	6,30	27,79	80,84	9,85	4,70	39,81
S3	k3	7,91	10,30	14,26	13,11	16,38	27,22	28,10	19,38	23,73	25,22	28,59	37,59
S4	k3	2,81	2,32	2,98	2,45	3,92	6,54	9,76	13,01	10,18	8,21	13,07	7,55
MR1	k5	1,95	2,06	2,77	2,44	3,36	5,59	6,86	7,00	6,49	5,95	8,11	7,18
MR2	k5	1,07	1,26	1,72	1,56	2,03	3,38	3,79	3,24	3,39	3,34	4,17	4,51
Capacidade	Média	9,7%	11,4%	15,5%	14,0%	18,3%	30,5%	34,4%	29,8%	30,9%	30,3%	38,0%	40,7%