



Universidade de Aveiro
2022

**Fábio José Ferraz
Simões**

**Avaliação no contexto da economia circular de
materiais de construção com resíduos da indústria
de pasta e papel**



Universidade de Aveiro
2022

**Fábio José Ferraz
Simões**

Avaliação no contexto da economia circular de materiais de construção com resíduos da indústria de pasta e papel

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para o cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação do Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Moraes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi realizado com o suporte do Projeto Europeu "PAPERCHAIN - New market niches for the Pulp and Paper Industry waste based on circular economy approaches" (grant nº 730305), financiado pelo programa H2020.

Contou também com o apoio da Unidade de Investigação RISCO na Universidade de Aveiro através dos projetos UIDB/04450/2020 e UIDP/04450/2020 da FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia).

Dedico este trabalho à minha família, e aos amigos pela inspiração que sempre me deram.

*Quando não se tem aquilo que se gosta é
necessário gostar-se daquilo que se tem”
Eça de Queirós*

o júri

Presidente

Prof. Doutor Nuno Miguel Gonçalves Borges de Carvalho
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor José Luis Barroso de Aguiar
Professor Associado com Agregação da Universidade do Minho

Prof. Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues
Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Prof. Doutora Castorina Fernanda da Silva Vieira
Professora Auxiliar da Universidade do Porto

Agradecimentos

Quando se olha para o término de uma etapa, pensa-se nas pessoas que ajudaram, direta ou indiretamente, na realização desse sonho. Deste modo, agradeço:

Primeiramente aos meus orientadores, Doutor Victor Ferreira e Doutor Miguel Morais, pela motivação e acompanhamento na elaboração do trabalho desenvolvido.

Em segundo lugar à Doutora Helena Paiva pela sua disponibilidade, motivação, acompanhamento e ensinamentos na realização do trabalho efetuado.

Ao departamento de Engenharia Civil, pelos meios disponibilizados e pela ajuda disponibilizada pelos seus técnicos, como a Engenheira Maria Carlos Figueiredo e o Sr. Vítor Rodrigues.

Aos parceiros do projeto *Paperchain*, nomeadamente The Navigator Company, Raiz, Megavia SA, Spral, Gaiker Institute, Tecnia, Acciona, Greenize e LGI, pelo apoio, colaboração e ensinamentos ao longo do trabalho desenvolvido. Um agradecimento especial pela colaboração e apoio ao Javier Rios, Amaia Sopolana, Olavo Cafofo, Tiago Marcelino, Cláudia Canha e à Nazaré Almeida.

Ao António Girão, pela ajuda nas batalhas vencidas, pela transmissão de tranquilidade durante as batalhas com resultados menos favoráveis, e a sua disponibilidade durante estes anos de aprendizagem.

A todos aqueles com quem tive o prazer de encontrar em Aveiro, a todos os que passaram no “DECivil”, alunos, professores e funcionários, especialmente a Eliana, Cláudia, Guillaume, José, Pedro, Francisco, Joana, Nuno, Tiago, Raquel, Élio, António, Filipe e Inês pelo apoio dado e pelos momentos que passamos juntos.

Por fim, e não menos importante, aos meus pais e à minha irmã, por acreditarem, apoiarem, investirem, lutarem durante estes anos todos, onde este momento é o culminar, “a cereja em cima do bolo” e, também, a todos os meus amigos.

Obrigado a todos!

palavras-chave

Materiais de Construção; Economia Circular; Avaliação de Ciclo de Vida; Valorização de Resíduos; Sustentabilidade.

Resumo

O sector da construção consome muitas matérias-primas naturais e outros recursos considerados finitos, tais como a água e a energia. Além disso, a produção de resíduos e de emissões de CO₂ têm aumentado, provocando um desequilíbrio nos ecossistemas. Por outro lado, a indústria da pasta do papel é um produtor intensivo de resíduos que são ainda depositados em aterro. Estes sectores seguem uma abordagem típica de economia linear (recursos-produção-aterro), mas este modelo não é viável para se promover a sustentabilidade. Em sentido contrário as abordagens de modelo circular são necessárias para se preservarem os recursos naturais e a vida no planeta.

Portanto, modelos inovadores de economia circular incluindo estratégias de valorização de resíduos como matérias-primas alternativas devem ser avaliadas, de modo a reduzir o esgotamento dos recursos naturais e, ao mesmo tempo, evitar-se a deposição em aterro.

Esta investigação envolveu uma revisão bibliográfica sobre a produção e a indústria de pasta de papel bem como sobre a utilização de resíduos como matérias-primas alternativas em produtos de construção e, ainda, uma revisão sobre a economia circular, construção sustentável e a avaliação do ciclo de vida de materiais de construção.

Os casos de estudo serviram o objetivo deste trabalho de validar à escala real a incorporação de resíduos da indústria de papel na produção de betão pré-fabricado e de pavimentos rodoviários, a partir das soluções desenvolvidas em laboratório. Além disso, estes casos de estudo suportaram o objetivo da avaliação da sustentabilidade e dos modelos de negócio circulares.

No primeiro caso, o resíduo cinza de cal substituiu o filler natural na produção de betão pré-fabricado, usado em três pórticos (6 pilares e 3 asnas) dum pavilhão industrial. No segundo caso de estudo, *dregs* e *grits* substituíram parcialmente o pó de calcário (0/4) usado na produção duma mistura (AC 14 *surface*), para a camada de desgaste duma estrada de 250 m. Ambos os demonstradores foram alvo de monitorização in situ e laboratorial, de modo a avaliar o desempenho técnico e a viabilidade das novas soluções. Esta avaliação incluiu as principais propriedades que são geralmente descritas nas declarações de desempenho (marcação CE) dos produtos tradicionais.

Além do desempenho técnico, a sustentabilidade, na dimensão social, económica e ambiental das novas soluções, foi avaliada usando a metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV). Por fim, analisaram-se os modelos de negócios das soluções circulares, de modo a reduzir os riscos de insucesso na aceitação do mercado por soluções circulares.

Ambos os casos de estudo demonstraram que estas simples ações causaram impactos positivos nas diferentes dimensões da sustentabilidade, sem alterar a produção e as propriedades relevantes dos materiais de construção.

Este trabalho de doutoramento foi realizado e apoiado pelo projeto H2020 PAPERCHAIN (contrato N°730305).

keywords

Construction Materials; Circular Economy; Life Cycle Analysis; Waste Valorisation; Sustainability.

abstract

The construction sector consumes a lot of natural raw materials and other resources (water and energy). In addition, ecosystems are not balanced due to increase of waste production and CO₂ emissions. On the other hand, the pulp and paper industry is a large producer of wastes that are most of them still deposited in landfills. These sectors have been following a linear economy approach (take-make-dispose), but this model is not feasible to promote sustainability. In the opposite direction, a circular approach is necessary to preserve the natural resources and our life in the planet.

In this work, the research involved a literature review on pulp and paper industry, their wastes and others used as alternative raw materials in construction products, as well as, a review on circular economy, sustainable construction and on life cycle analysis on construction materials.

The study cases served the purpose of this work to validate on a real scale the incorporation of waste from the paper and pulp industry in the production of precast concrete and road pavements, from solutions developed in the laboratory. Furthermore, these study cases supported the objective of sustainability assessment and circular business models.

In the first case, a natural filler was entirely replaced by lime ash waste to produce precast concrete and this material was used to built three frames or porticos (6 columns and 3 beams) of an industrial pavilion. Although, the second case, dregs and grits were partially used to replace fine aggregate (0-4mm) in a bituminous mixture (AC 14 surface type) to produce a surface layer of 250m in a road. Both cases were lab and in situ controlled and monitored to evaluate technical performance and the feasibility of the new solutions. This evaluation included the main properties that are usually included in CE marking datasheet of bituminous products.

LCA analyses were performed to evaluate the impacts and benefits at environmental, economic, and social levels. Finally, circular business models were analysed, in order to reduce unsuccessful risks from potential clients for new circular solutions.

All case studies allowed to demonstrate that those simple actions generated positive impacts in the evaluated dimensions of sustainability without causing any changes in production time or degradation on relevant properties of construction materials.

This PhD work was being done and supported by the H2020 project PAPERCHAIN (Grant N°730305).

Índice

| | |
|--|-----|
| Índice de Figuras | III |
| Índice de Tabelas..... | V |
| Abreviaturas | IX |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Enquadramento..... | 1 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Organização..... | 4 |
| 2. Economia circular e a construção sustentável..... | 9 |
| 2.1. Economia circular | 9 |
| 2.1.1. Conceitos e princípios | 9 |
| 2.1.2. Limitações da economia circular..... | 23 |
| 2.1.3. Indicadores de circularidade..... | 26 |
| 2.1.4. Transição para um modelo de economia circular..... | 33 |
| 2.2. Papel da construção sustentável na economia circular..... | 38 |
| 2.2.1. A construção sustentável..... | 38 |
| 2.2.2. O contributo dos materiais de construção para os 5R's numa economia circular | 42 |
| 3. Valorização de resíduos em materiais de construção..... | 49 |
| 3.1. Uso de resíduos e a legislação associada..... | 49 |
| 3.2. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários | 58 |
| 3.3. Valorização de resíduos em materiais cimentícios..... | 60 |
| 3.4. Valorização de resíduos em materiais cerâmicos..... | 69 |
| 3.5. Valorização em outros materiais de construção | 72 |
| 4. Uso da avaliação de ciclo de vida como ferramenta de eco-inovação | 81 |
| 4.1. Avaliação de ciclo de vida – metodologia e programas de apoio | 81 |
| 4.2. Alguns estudos de ACV em materiais de construção..... | 87 |
| 5. Valorização de resíduos da indústria de pasta e papel em materiais de construção à escala industrial..... | 93 |
| 5.1. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários | 95 |
| 5.1.1. Descrição do caso de estudo..... | 96 |
| 5.1.2. Execução e monitorização do caso piloto | 104 |
| 5.1.3. Análise da viabilidade técnica..... | 131 |

| | |
|--|-----|
| 5.1.4. Transição para a economia circular | 135 |
| 5.2. Valorização de resíduos em betão pré-fabricado..... | 137 |
| 5.2.1. Descrição do caso de estudo..... | 139 |
| 5.2.2. Execução e monitorização do caso piloto..... | 146 |
| 5.2.3. Análise da viabilidade técnica | 169 |
| 5.2.4. Transição para a economia circular | 171 |
| 6. Avaliação da sustentabilidade das operações de valorização de resíduos..... | 175 |
| 6.1. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários | 177 |
| 6.1.1. Avaliação ambiental | 179 |
| 6.1.2. Avaliação económica | 187 |
| 6.1.3. Avaliação social | 189 |
| 6.2. Valorização de resíduos em betão pré-fabricado..... | 191 |
| 6.2.1. Avaliação ambiental | 193 |
| 6.2.2. Avaliação económica | 201 |
| 6.2.3. Avaliação social | 204 |
| 7. Avaliação do modelo de negócio circular para as operações de valorização de resíduos..... | 211 |
| 7.1. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários | 213 |
| 7.2. Valorização de resíduos em betão pré-fabricado..... | 227 |
| 8. Considerações finais | 239 |
| 8.1. Conclusões | 239 |
| 8.2. Trabalhos futuros..... | 242 |
| Referências bibliográficas | 247 |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----|
| Figura 1. Aplicação do conceito de economia circular. | 13 |
| Figura 2. Princípios da economia circular. | 14 |
| Figura 3. Diferentes formas de criação de valor na economia circular. | 16 |
| Figura 4. Representação do modelo de funcionamento da economia circular. | 17 |
| Figura 5. Áreas da cadeia de valor da economia circular. | 20 |
| Figura 6. Dez indicadores de monitorização da economia circular. | 29 |
| Figura 7. Momentos históricos na definição de economia circular. | 35 |
| Figura 8. Pontos a considerar na construção sustentável. | 39 |
| Figura 9. Potencial económico e de circularidade de vários sectores. | 41 |
| Figura 10. Hierarquização de gestão de resíduos. | 49 |
| Figura 11. Esquema de uma fábrica de pasta Kraft de papel. | 55 |
| Figura 12. Produção de resíduos sólidos. | 56 |
| Figura 13. Destino dos resíduos sólidos produzidos. | 56 |
| Figura 14. Tipos de resíduos provenientes do processo Kraft e respetivas fases. | 57 |
| Figura 15. Fases de uma avaliação de ciclo de vida. | 83 |
| Figura 16. Produção total de misturas betuminosas a quente e semi-quente na União Europeia. ... | 96 |
| Figura 17. Modelo de produção linear do setor de pasta e papel e dos pavimentos rodoviários. | 97 |
| Figura 18. Esquema de uma central da mistura betuminosa. | 98 |
| Figura 19. Esquema do processo de uma unidade de fabril da pasta de papel pelo método kraft e resíduos gerados. | 99 |
| Figura 20. Esquema do processo de recuperação de químicos e energia. | 100 |
| Figura 21. Amostras dos resíduos: a) dregs e b) grits. | 101 |
| Figura 22. Modelo de produção circular dos dregs e dos grits nas misturas betuminosas. | 102 |
| Figura 23. Planta de implementação do caso de estudo (verde -referência, azul -dregs e rosa – grits). | 104 |
| Figura 24. Troço da estrada pavimentada com e sem resíduos. | 112 |
| Figura 25. Aspeto visual entre os dregs, grits e pó de calcário. | 113 |
| Figura 26. Distribuição de partícula dos dregs, grits e pó de calcário (0/4). | 113 |
| Figura 27. Curva granulométrica da mistura de agregados com e sem resíduos usada na produção das misturas betuminosas e o fuso granulométrico do AC 14 surface imposto pelo CETO da IP. | 115 |
| Figura 28. Controlo da temperatura à saída da pavimentadora. | 115 |
| Figura 29. Controlo laboratorial sobre as misturas betuminosas. | 116 |
| Figura 30. Resultados da análise granulométrica das misturas betuminosas em julho e agosto de 2020. | 118 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31. Resultados da análise granulométrica das misturas betuminosas em novembro e dezembro de 2020. | 119 |
| Figura 32. Controlo ambiental realizado em laboratório..... | 121 |
| Figura 33. Etapas da extração de carotes para análise..... | 121 |
| Figura 34. Estrutura do pavimento das camadas ligadas (carotes)..... | 122 |
| Figura 35. Resultados da distribuição granulométrica dos carotes retirados da 1º extração. | 122 |
| Figura 36. Resultados da distribuição granulométrica dos carotes retirados da 2º extração. | 123 |
| Figura 37. Sumidouros e posição onde as amostras foram recolhidas. | 128 |
| Figura 38. Limites do fuso granulométrico do AC 14 surface. | 132 |
| Figura 39. Constituição do betão (% em volume)..... | 138 |
| Figura 40. Modelo de produção linear do setor de pasta e papel e do setor de betão pré-fabricado. | 139 |
| Figura 41. Esquema de central de betão. | 140 |
| Figura 42. Amostra do resíduo (cinza de cal)..... | 140 |
| Figura 43. Modelo de produção circular no betão pré-fabricado com cinza de cal..... | 142 |
| Figura 44. Disposição dos quatro pórticos do caso de estudo. | 143 |
| Figura 45. Viga de secção variável: a) Secção nos topos; B) Secção ½ vão..... | 144 |
| Figura 46. Secção transversal do pórtico do pavilhão industrial. | 145 |
| Figura 47. Análise visual comparativa entre a cinza de cal e o filler natural. | 151 |
| Figura 48. Análise granulométrica do filler natural e da cinza de cal. | 152 |
| Figura 49. Curva granulométrica da fração <63 µm da cinza de cal e do filler natural. | 152 |
| Figura 50. Difrátograma de raios-X do filler natural. | 153 |
| Figura 51. Difrátograma de raios-X da cinza de cal..... | 153 |
| Figura 52. Recolha e cura dos provetes de betão com cinza de cal e de filler natural. | 154 |
| Figura 53. Densidade dos pilares e das asnas de betão no estado endurecido. | 155 |
| Figura 54. Resistência à compressão dos pilares e das asnas de betão no estado endurecido..... | 156 |
| Figura 55. Controlo do grau de hidratação do betão. | 156 |
| Figura 56. UPV e módulo de elasticidade do betão dos pilares e das asnas. | 157 |
| Figura 57. Absorção da água do betão dos pilares e das asnas. | 158 |
| Figura 58. Coeficiente de capilaridade do betão dos pilares e das asnas. | 158 |
| Figura 59. Controlo das eflorescências no betão..... | 159 |
| Figura 60. Instalação dos sensores internos (1/2 e 1/3 vão). | 159 |
| Figura 61. Temperatura após betonagem até 31/1: a) sensor a ½ vão; b) sensor a 1/3 vão..... | 160 |
| Figura 62. Deformações após betonagem até 31/1: a) sensor a ½ do vão; b) sensor a 1/3 do vão. | 161 |

| | |
|--|-----|
| Figura 63. A) sensor externo que regista a temperatura do ar e a humidade relativa; b) data logger para registo da frequência e temperatura dos sensores internos e externos. | 162 |
| Figura 64. A) Sensor externo (a ½ do vão na asna); b) posição (superior, intermédia, inferior). .. | 162 |
| Figura 65. Resultados da monitorização de 1 ano na: a) temperatura do ar (sensor externo); b) humidade relativa (sensor externo); c) temperatura externa (sensor exterior) e temperatura interna (sensor embebido). | 164 |
| Figura 66. Resultados da monitorização de 1 ano da deformação: a) ½ do vão; b) 1/3 do vão; c) sensor superior; d) sensor intermédio; e) sensor inferior. | 167 |
| Figura 67. Estimativa da dureza superficial (RCS) e do módulo de elasticidade (E). | 167 |
| Figura 68. Medida de pH no betão pré-fabricado com cinza de cal e com filler natural. | 168 |
| Figura 69. Processos, etapas e limites do sistema de produto das misturas betuminosas. | 178 |
| Figura 70. Impactos ambientais atingidos pela solução circular. | 186 |
| Figura 71. Custos por operação do modelo linear e circular das misturas betuminosas por m ² de mistura betuminosa com 5 cm de espessura. | 187 |
| Figura 72. Distribuição dos tipos de custo do modelo linear e circular das misturas betuminosas por m ² de mistura betuminosa com 5 cm de espessura. | 188 |
| Figura 73. Melhorias sociais atingidas pelas misturas betuminosas. | 191 |
| Figura 74. Processos, etapas e limites do sistema de produto (asna e pilar de betão). | 192 |
| Figura 75. Melhorias ambientais atingidas no modelo circular (pilar). | 197 |
| Figura 76. Melhorias ambientais atingidas no modelo circular (asna). | 201 |
| Figura 77. Custos por operação do modelo linear e circular do pilar por m ³ de betão. | 201 |
| Figura 78. Distribuição dos tipos de custo do modelo linear e circular do pilar por m ³ de betão. . | 202 |
| Figura 79. Custos por operação do modelo linear e circular da asna por m ³ de betão. | 203 |
| Figura 80. Distribuição dos tipos de custo do modelo linear e circular da asna por m ³ de betão. . | 203 |
| Figura 81. Melhorias sociais atingidas pelo modelo circular do pilar. | 205 |
| Figura 82. Melhorias sociais atingidas pelo modelo asna. | 206 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Constrangimentos, fatores facilitadores e possíveis soluções nos modelos de negócio... 19 | 19 |
| Tabela 2. Vantagem económica, ambiental e social resultante da aplicação da economia circular. 21 | 21 |
| Tabela 3. Contribuição da Economia circular nos ODS. | 22 |
| Tabela 4. Principais limites e desafios do desenvolvimento da economia circular. | 24 |
| Tabela 5. Barreiras e fatores associados à economia circular | 25 |
| Tabela 6. Limites e desafios da economia circular. | 26 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 7. Indicadores para monitorizar a economia circular..... | 28 |
| Tabela 8. Indicadores que medem a economia circular à escala micro..... | 30 |
| Tabela 9. Lista de 55 indicadores da economia circular na literatura. | 31 |
| Tabela 10. Indicadores únicos e múltiplos para avaliar a implementação da economia circular. | 33 |
| Tabela 11. Reduções e benefícios da mudança de uma economia linear para economia circular..... | 36 |
| Tabela 12. Constrangimentos, fatores facilitadores e soluções na UE..... | 36 |
| Tabela 13. Constrangimentos, fatores facilitadores e possíveis soluções nos países e regiões..... | 37 |
| Tabela 14. Vantagens da construção sustentável. | 40 |
| Tabela 15. Lista de capítulos da Lista Europeia de resíduos (LER)..... | 51 |
| Tabela 16. Legislação europeia associada ao resíduo. | 52 |
| Tabela 17. Valores limites para resíduo inerte, de acordo com o DL n.º 183/2009. | 54 |
| Tabela 18. Resíduos da indústria de pasta e papel, de acordo com a LER..... | 55 |
| Tabela 19. Designação dos resíduos da indústria de pasta e papel e o seu código LER. | 58 |
| Tabela 20. Identificação das soluções de valorização em pavimentos rodoviários..... | 59 |
| Tabela 21. Identificação das soluções de valorização em materiais cimentícios. | 61 |
| Tabela 22. Identificação das soluções de valorização em materiais cerâmicos. | 69 |
| Tabela 23. Identificação das soluções de valorização em outros materiais de construção..... | 73 |
| Tabela 24. Normas da avaliação de ciclo de vida. | 82 |
| Tabela 25. Aspetos a considerar na definição do objetivo e no âmbito do estudo..... | 83 |
| Tabela 26. Programas informáticos para ACV no sector da construção. | 86 |
| Tabela 27. Soluções de valorização de alguns resíduos da indústria de pasta e papel em materiais de construção à escala industrial no projeto Paperchain. | 94 |
| Tabela 28. Quantidade de dregs, grits e lama de cal gerada na produção de 1 ton de pasta (kg/ton em base seca)..... | 95 |
| Tabela 29. Identificação da composição química dos diferentes resíduos pela XRF..... | 101 |
| Tabela 30. Identificação da composição mineralógica dos diferentes resíduos pela DRX. | 102 |
| Tabela 31. Implementação das misturas betuminosas com e sem resíduos na camada de desgaste. | 107 |
| Tabela 32. Resultados da caracterização dos dregs, grits e pó de calcário..... | 114 |
| Tabela 33. Formulação das misturas betuminosas (AC 14 surface)..... | 114 |
| Tabela 34. Características das misturas betuminosas em julho/ agosto de 2020..... | 117 |
| Tabela 35. Características das misturas betuminosas em novembro/dezembro de 2020. | 119 |
| Tabela 36. Resultados dos lixiviados em laboratório..... | 120 |
| Tabela 37. Características das misturas betuminosas nos carotes da 1º extração..... | 123 |
| Tabela 38. Características das misturas betuminosas nos carotes da 2º extração..... | 124 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 39. Anomalias identificadas durante a inspeção visual. | 125 |
| Tabela 40. Tabela definidora das degradações em pavimentos flexíveis. | 126 |
| Tabela 41. Metodologia para quantificar o valor do IRI. | 127 |
| Tabela 42. Índice de qualidade do caso de estudo, após um ano de serviço. | 128 |
| Tabela 43. Resultados mensais dos cloretos, nos lixiviados do sistema de drenagem do caso de estudo. | 129 |
| Tabela 44. Resultados trimestrais dos lixiviados do sistema de drenagem do caso de estudo. | 130 |
| Tabela 45. Resultados semestrais dos lixiviados do sistema de drenagem do caso de estudo. | 130 |
| Tabela 46. Requisitos que os agregados naturais devem obedecer para serem utilizados na produção do betão betuminoso. | 132 |
| Tabela 47. Requisitos/propriedades do AC 14 surface | 133 |
| Tabela 48. Valores limite de lixiviação para admissão em aterros para resíduos inertes. | 133 |
| Tabela 49. Identificação da composição química dos diferentes resíduos por XRF. | 141 |
| Tabela 50. Identificação da composição mineralógica dos diferentes resíduos por DRX. | 141 |
| Tabela 51. Características dos pilares do caso de estudo. | 144 |
| Tabela 52. Características das asnas do caso de estudo | 144 |
| Tabela 53. Implementação do modelo circular do betão pré-fabricado incorporando cinza de cal. | 148 |
| Tabela 54. Distribuição granulométrica da fração < 63 µm da cinza de cal e do filler natural. | 152 |
| Tabela 55. Características da cinza de cal e do filler. | 153 |
| Tabela 56. Formulação do betão de referência para se produzir os elementos lineares dos pórticos. | 154 |
| Tabela 57. Resultados da resistência à compressão superficial e do módulo de elasticidade. | 168 |
| Tabela 58. Requisito do Fuso granulométrico do filler natural. | 169 |
| Tabela 59. Qualidade do betão baseada nos valores de UPV. | 169 |
| Tabela 60. Impactos ambientais da deposição dos resíduos em aterro na produção linear da mistura betuminosa. | 179 |
| Tabela 61. Resultados dos impactos ambientais dos agregados na produção da mistura betuminosa. | 180 |
| Tabela 62. Resultados dos impactos ambientais do betume, do transporte do filler natural e da nafta usada na central betuminosa. | 180 |
| Tabela 63. Resultados dos impactos ambientais dos equipamentos usados nos trabalhos de pavimentação da camada de desgaste. | 181 |
| Tabela 64. Resultados dos impactos ambientais do modelo linear (deposição do resíduo em aterro, produção e aplicação da mistura betuminosa de referência). | 182 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 65. Resultados dos impactos ambientais do pré-tratamento dos dregs no operador de gestão de resíduos..... | 183 |
| Tabela 66. Resultados dos impactos ambientais do pré-tratamento dos grits no operador de gestão de resíduos..... | 183 |
| Tabela 67. Resultados dos impactos ambientais dos agregados na produção da mistura betuminosa com dregs e com grits..... | 184 |
| Tabela 68. Resultados dos impactos ambientais da solução circular dos dregs (pré-tratamento dos resíduos, produção e aplicação da mistura betuminosa). | 185 |
| Tabela 69. Resultados dos impactos ambientais da solução circular dos grits (pré-tratamento dos resíduos, produção e aplicação da mistura betuminosa). | 185 |
| Tabela 70. Stakeholders – Categoria e subcategorias associadas para o modelo linear e circular. | 190 |
| Tabela 71. Desempenho social do ciclo de vida do modelo linear e circular das misturas betuminosas. | 190 |
| Tabela 72. Resultados dos impactos ambientais da deposição do resíduo em aterro seguindo a produção de betão para o pilar. | 193 |
| Tabela 73. Impactos ambientais dos agregados na produção de betão pré-fabricado do pilar..... | 194 |
| Tabela 74. Impactos ambientais para os outros componentes da formulação do betão pré-fabricado do pilar..... | 194 |
| Tabela 75. Impactos ambientais do aterro, da produção de betão pré-fabricado e do total do modelo linear..... | 195 |
| Tabela 76. Resultados dos impactos ambientais do transporte da cinza de cal para o betão pré-fabricado do pilar e total dos impactos ambientais do modelo circular do betão pré-fabricado (pilar). | 196 |
| Tabela 77. Resultados dos impactos ambientais da deposição do resíduo em aterro seguindo a produção de betão para a asna..... | 198 |
| Tabela 78. Impactos ambientais dos agregados na produção de betão pré-fabricado da asna. | 198 |
| Tabela 79. Impactos ambientais para os outros componentes da formulação do betão pré-fabricado da asna. | 199 |
| Tabela 80. Impactos ambientais do aterro, da produção de betão pré-fabricado da asna e do total do modelo linear..... | 199 |
| Tabela 81. Resultados dos impactos ambientais do transporte da cinza de cal para o betão pré-fabricado da asna e total dos impactos ambientais do modelo circular do betão pré-fabricado (asna). | 200 |
| Tabela 82 Desempenho social do ciclo de vida do modelo linear e circular do betão pré-fabricado (pilar)..... | 204 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 83. Desempenho social do ciclo de vida do modelo linear e circular do betão pré-fabricado (asna)..... | 206 |
| Tabela 84. Inquérito online para análise sobre o conhecimento do mercado dos potenciais clientes (stakeholders)..... | 211 |
| Tabela 85. Barreiras e questões associadas, de modo a eliminar os constrangimentos do caso de estudo..... | 212 |
| Tabela 86. Guião para as entrevistas..... | 213 |
| Tabela 87. Barreiras na utilização de dregs e de grits nas misturas betuminosas (MB). | 218 |
| Tabela 88. Análise SWOT do caso de estudo (misturas betuminosas e betão pré-fabricado). | 225 |
| Tabela 89. Barreiras na utilização da cinza de cal no betão pré-fabricado. | 229 |

Abreviaturas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

AP – Acidificação

ADP –Depleção dos recursos abióticos não fósseis

ADP-FF – Depleção dos recursos abióticos fósseis

BM – Mistura Betuminosa

CE – *Circular Economy*

CED – Demanda ou necessidades de energia acumulada

CEM – *Circular Economy Model*

CETO – Caderno de Encargos Tipo Obra das Infraestruturas de Portugal

DRX - Difração de raio X

e-ACV – *Environmental life cycle analysis*

Eq – Equivalente

EU – União Europeia

EP – Eutrofização

EAF - Escórias de alto forno

GWP 100 –Aquecimento global

IP – Infraestruturas de Portugal

IQ – Índice de qualidade

LCC – *Life cycle costing*

L.Q. – Limite de Quantificação

ODP –Depleção de Ozono Estratosférico

POFP – Formação de oxidantes fotoquímicos

PPI – Indústria de pasta e papel

RCS – Resistência à compressão superficial

RCD – Resíduos da construção e demolição

REF – Referência

s-ACV – *Social life cycle analysis*

SILIAMB – Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente

SRMs – Secondary raw material

VRM – Virgin raw material

WU – Uso de água

XRF – Espectrometria de difração de raio X

WPFA – Wastepaper Fly Ash

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Nos últimos anos, a sociedade tem procurado adaptar-se, em muitos campos, a um modelo de economia circular em vez do tradicional modelo linear. Ao prosseguir no conceito de economia linear, a indústria pode esgotar os recursos de que depende num curto espaço de tempo (entre 10 e 50 anos). Por exemplo, o orçamento em recursos naturais, para o ano de 2018, foi consumido cinco meses antes do seu término. Basicamente, neste modelo linear extraem-se as matérias-primas da natureza, depois transformam-se em produtos consumíveis e no fim de vida estes são depositados em aterro (O'Callaghan, 2018).

Em 2010, a economia global consumiu cerca de 65 mil milhões de toneladas de recursos. Atualmente e em 2050 consumir-se-á 100 e 186 mil milhões de toneladas de recursos, respetivamente. Para se satisfazer o consumo anterior serão necessários três planetas. Deste modo, as empresas e os diferentes intervenientes necessitam de mudar rapidamente os seus comportamentos e, nos últimos anos, têm surgido para estimular esta mudança, diferentes agendas ou protocolos, nomeadamente, o Acordo de Paris, a agenda do desenvolvimento sustentável das Nações Unidas, ou o pacote de economia circular da Comissão Europeia e o seu plano de ação.

Em 2015, as Nações Unidas lançaram um conjunto de 17 objetivos de desenvolvimento sustentável, e o número 12 remete para a produção e consumo sustentável. Dentro deste objetivo existem duas metas que estão relacionadas com os materiais de construção. A meta 12.2 recomenda a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais até 2030. Enquanto, a meta 12.5 propõe a redução de resíduos através da prevenção, redução, reciclagem e reutilização até 2030 (INE, 2018).

Surge assim o modelo de economia circular, que através do redesenho dos processos, pretende aumentar a reciclagem, a recuperação, reutilização e redução de materiais e energia (Correia *et al.*, 2017). A aplicação deste modelo circular deve também fazer aparecer benefícios associados, como o crescimento económico, a poupança de recursos, o crescimento do emprego e a inovação (O'Callaghan, 2018).

O cenário da pegada ecológica tem sido estudado ao longo dos anos, e se o modelo linear continuar em vigor, a sociedade, em 2050, precisará de cerca de 2,3 planetas Terra para satisfazer as suas necessidades. Mas, no caso da economia circular, a sociedade poderia

apenas consumir 1,1 planetas Terra para suprimir as suas carências (WBCSD e BCSD, 2010).

A sustentabilidade tem sido debatida em vários locais e, por exemplo, na conferência da *Climate Change LeaderShip Porto Summit 2018*, vários oradores puderam acentuar várias pontos-chave (National Geographic, 2018):

- *“Os nossos antepassados já seguiam políticas de sustentabilidade. Hoje, nós temos o conhecimento e a tecnologia, mas nada fazemos.”* (Moahan Munasinghe)
- *“Temos de reconhecer que não vamos resolver os problemas sozinhos. Temos de trabalhar em conjunto para construirmos um mundo melhor”* (Barack Obama)
- *“Não nos podemos dar ao luxo de escolher entre a economia e o planeta. Sem o planeta não há economia. Temos de apostar nos dois”* (Juan Verde)

Os diferentes intervenientes (empresas, governos e países) têm vindo a aperceber-se que o modelo de economia linear não é adequado ao desenvolvimento sustentável. Neste sentido surge o modelo de economia circular que deve rapidamente suceder ao modelo de economia linear vigente (Leitão, 2015; Lemos, 2018).

O sector da construção, que utiliza diferentes materiais de construção, nomeadamente, cimento, agregados, betão, tijolos, telhas, argamassas e misturas betuminosas deve encontrar uma forma de aumentar a sustentabilidade na construção, por exemplo através da introdução de resíduos de outras indústrias como matérias primas alternativas em materiais de construção (Torgal e Jalali, 2008).

Por outro lado, o setor da indústria de pasta e papel gera grandes quantidades de resíduos por ano e o seu processo produtivo produz resíduos durante as fases de produção da energia, de produção de pasta e papel e no tratamento de efluentes. Na fase da produção da energia são geradas cinzas volantes e cinzas de fundo. Enquanto, na produção de pasta e papel são produzidas lamas de cal, *grits* e *dregs* e, no tratamento de efluentes são geradas lamas primárias e lamas biológicas (Pinho, 2014). Por exemplo, apenas como exemplo, as areias do leiteo fluidizado já hoje são usadas como um subproduto na produção de uma argamassa cola pela indústria. Esta utilização de resíduos por outras indústrias promove a redução de resíduos em aterro e, ao mesmo tempo, diminui a exploração de matérias-primas tradicionais.

O setor de pasta e papel e o da construção podem trabalhar em simbiose, de modo a aumentar o número de soluções circulares no mercado, através da valorização dos resíduos da celulose pelo setor dos materiais de construção. É assim muito importante que outros casos sejam explorados e discutidos, mas também validados do ponto de vista do desempenho técnico das soluções, da sua sustentabilidade e do ponto de vista do modelo de negócio circular que os suportará para serem viáveis. Este trabalho procurou fazer esta abordagem de incorporação de um modelo de economia circular aplicado a materiais de construção.

1.2. Objetivos

Numa fase inicial, a sociedade começou a preocupar-se com a degradação do meio ambiente, devido à diminuição de jazidas de matérias-primas não renováveis e aos problemas ambientais relacionados com as explorações. Além disso, a sociedade está numa fase de mudança de modelo económico, ou seja, desde a revolução industrial que a visão sobre a economia estava assente num modelo de produção linear, mas a necessidade de um desenvolvimento mais sustentável obrigou a procurar um modelo de economia circular que salvaguardasse mais os recursos (energia, água e materiais) essenciais para a humanidade no planeta. Neste contexto tem-se procurado diferentes estratégias de ação para atingir o equilíbrio ambiental e económico do planeta, através de casos como o pacote de ação da economia circular e do pacote da neutralidade carbónica em 2050.

Nos últimos anos, a sociedade estudou diferentes soluções de valorização de resíduos na área da construção enquanto recetor de vários resíduos. Contudo, após estudos realizados num contexto laboratorial é imperativo, antes da comercialização das soluções, avaliar a incorporação dos resíduos ao nível industrial (escala real). Além disso, a solução circular industrial deve também ser competitiva ao nível económico, de modo a ser uma solução alternativa relativamente à solução linear.

Este trabalho tem por objetivo geral verificar e validar a incorporação de resíduos da indústria da pasta e papel em dois tipos de materiais de construção (misturas betuminosas e betão pré-fabricado) num contexto industrial, de modo a validar um modelo circular e evitando-se a deposição dos resíduos em aterro. Assim, este trabalho procura avaliar o desempenho técnico, o grau de sustentabilidade ambiental, económico e social no contexto

de um modelo de economia circular, validando o modelo de negócio associado. São assim várias as questões que este trabalho de doutoramento procura responder através de um conjunto de objetivos específicos (**OE**), a saber:

OE1. Verificar se é tecnicamente possível a incorporação de resíduos industriais do setor da pasta e papel como matérias primas alternativas em materiais de construção como o betão pré-fabricado ou em misturas betuminosas para a camada de desgaste superficial de uma estrada sem degradar as suas características fundamentais.

OE2. Determinar que tratamentos preliminares são necessários aos resíduos para tal aplicação e que parâmetros devem ser controlados em ambos os casos numa escala real de aplicação e validação da solução circular.

OE3. Entender e utilizar a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) para apreciar o grau de sustentabilidade ambiental, económico e social destas duas soluções circulares face ao estado de referência atual dos modelos respetivos de produção linear corrente, bem como, determinar quais os impactos gerados pela solução “circular” face à referência atual do respetivo caso “linear”.

OE4. Compreender, relativamente ao modelo de negócio de suporte a estas alterações induzidas nos dois casos de estudo, quais são os elementos críticos, as barreiras ou condicionantes para uma aplicação com sucesso do modelo circular.

1.3. Organização

A presente dissertação encontra-se estruturada em 8 capítulos. No capítulo 1 faz-se uma introdução do trabalho, nomeadamente o seu enquadramento, objetivos e organização. No enquadramento procura-se explicar a importância da economia circular e da sua implementação em materiais de construção com resíduos da indústria da pasta e papel, fundamentando o desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 2, é efetuado um estado da arte sobre a economia circular e sobre o papel da construção sustentável na economia circular. No caso da economia circular abordam-se os conceitos e princípios, depois, exploram-se os seus limites ou condicionantes. Feita essa descrição, identifica-se diferentes indicadores que medem o seu grau de implementação e, por fim, aborda-se a transição para uma economia circular. Na segunda parte do capítulo define-se construção sustentável, identificando-se os seus princípios, com o objetivo de

relacioná-la com a economia circular, através da lógica dos 5R's (reduzir, reciclar, reutilizar, remanufatura e reparar).

No capítulo 3, é realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso de resíduos como matérias-primas alternativas. Inicialmente, define-se resíduo e apresenta-se a legislação associada. Além disso, apresentam-se os resíduos da indústria da pasta e papel. Por fim, apresentam-se os contributos de diferentes soluções de valorização com resíduos da indústria da pasta e papel em pavimentos rodoviários, em materiais cimentícios e cerâmicos.

No capítulo 4, é feito um estado-da-arte sobre a avaliação de ciclo de vida (ACV) como ferramenta de eco-inovação. Na primeira fase explica-se a ferramenta da avaliação de ciclo de vida e, de seguida, mostram-se alguns exemplos de ACV em materiais de construção com resíduos.

No capítulo 5, são então apresentados os dois casos de estudo da incorporação de resíduos da indústria da pasta e papel em materiais de construção à escala real (em betão pré-fabricado e pavimento rodoviário), de modo a avaliar a sua viabilidade técnica. Previamente, descreve-se o contexto dos dois casos de estudo, bem como a sua execução e o plano de monitorização implementado.

No capítulo 6, analisa-se a sustentabilidade das duas operações de valorização de resíduos em materiais de construção (pavimentos rodoviários e betão pré-fabricado), pela dimensão social, ambiental e económica, através da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV).

No capítulo 7, avaliam-se as condicionantes e o modelo negócio desta simbiose industrial entre a indústria da Pasta e Papel e o sector da construção, nomeadamente nos pavimentos rodoviários e no betão pré-fabricado. Esta avaliação contemplou a própria replicabilidade dos casos de estudo, o panorama do mercado e as barreiras que podem afetar a aceitação do mercado.

Por fim, o capítulo 8 é dedicado à apresentação das conclusões principais, onde se faz uma síntese dos assuntos abordados e desenvolvidos ao longo desta dissertação. Nesta secção, são também sugeridos alguns desenvolvimentos futuros possíveis, relacionados com a temática da economia circular nos materiais de construção.

Capítulo 2

Economia circular e a construção sustentável

2. Economia circular e a construção sustentável

2.1. Economia circular

2.1.1. Conceitos e princípios

Nos últimos anos, o modelo de economia linear (extração, produção, consumo/uso e eliminação ou deposição em aterro) demonstrou uma incapacidade para assegurar um desenvolvimento sustentável, a proteção do meio ambiente e o bem-estar da sociedade. Em sentido oposto, a sustentabilidade do planeta só pode ser garantida através da aplicação do conceito de uma economia circular. (Bocken *et al.*, 2016; Jawahir e Bradley, 2016; Jørgensen e Pedersen, 2018; Kalmykova *et al.*, 2018). Este conceito foi desenvolvido ainda na década de 70, mas só nos últimos anos apareceu na agenda política de diferentes intervenientes, através da definição de políticas ou planos de ação que pretendem alterar o modelo linear para um modelo circular. Antes da definição dos planos houve diversas abordagens por várias escolas de pensamento (design regenerativo, economia de performance, “*cradle to cradle*”, biomimética e “*blue economy*”) (COTEC, 2016a, 2016b; Ellen MacArthur Foundation, 2017; Fraga, 2017; Geissdoerfer *et al.*, 2017):

- John T. Lyle (anos 70) fundou o movimento de design regenerativo. Inicialmente, o conceito da regeneração era aplicado na agricultura, mas poderia ser aplicado em todos os sistemas, ou seja, as atividades diárias estariam dentro dos limites dos recursos renováveis disponíveis sem que houvesse degradação ambiental. Também desenvolveu as bases de trabalho da economia circular que, depois foram desenvolvidas por Bill McDonough, Michael Braungart e Walter Stahel.
- Walter Stahel (anos 70 e 90) partilhou a visão de uma economia em ciclos e o seu impacto na criação de emprego, competitividade económica, redução de recursos e prevenção de desperdícios. Esta visão foi abordada no relatório “*O potencial de substituir Mão-de-obra por Energia*”. Além disso, criou o conceito *Cradle to Cradle*. Também desenvolveu uma abordagem de ciclos fechados para processos de produção.
- David W. Pearce e R. Kerry Turner (1989) referenciaram, pela primeira vez, o conceito de economia circular, na obra “*Economics of natural resources and the Environment*”.

- Michael Braungart prosseguiu o desenvolvimento, em parceria com Bill McDonough, do conceito e do processo de certificação *Cradle to Cradle*. Os materiais utilizados nesta filosofia *Cradle to Cradle* são designados nutrientes técnicos e biológicos, e os produtos concebidos nesta abordagem apresentam um impacto positivo e um reduzido impacto negativo. Além disso, a abordagem suprime o conceito de resíduo, usa a energia de fontes renováveis e utiliza a responsabilidade social para celebrar a diversidade.
- Janine Benyus (anos 80 e 90) fundou a corrente biomimética, ou seja, analisar os melhores processos da natureza e, depois usar estes processos para resolver os problemas humanos. Assim, a abordagem assenta em três princípios à volta da natureza como modelo, como medida e como mentora.
- Gunter Pauli (anos 90) fundou o movimento *blue economy*, ou seja, uma ideia open source, que contém pesquisas de casos concretos e que respondam à seguinte ideia “ao usarmos recursos em sistemas de cascata, os resíduos de um produto tornam-se *inputs* para se criar um novo fluxo de caixa”.
- Ellen MacArthur (2010) fundou a organização *Ellen MacArthur Foundation* com o objetivo de criar mecanismos e suporte para acelerar a transição para economia circular.

Alguns trabalhos científicos focaram-se na pesquisa de definições de economia circular na literatura. Por exemplo, o trabalho realizado por (Kirchherr *et al.*, 2017) encontrou 114 definições que foram agrupadas nos princípios fundamentais da estrutura dos 4R's, da hierarquia dos resíduos, do sistema de perspetiva (micro, meso e macro), do desenvolvimento sustentável, da qualidade ambiental, da prosperidade económica, da equidade social, das gerações futuras, dos modelos de negócio e dos consumidores.

Em 2008, a legislação chinesa definia economia circular como um termo genérico para as atividades de redução, reutilização e reciclagem dirigidas no processo de produção, circulação e consumo, no entanto, esta definição não é compatível com os padrões de crescimento da sociedade chinesa na produção e consumo. Por outro lado, outros países, tais como alguns Europeus, o Japão, Coreia, EUA e Vietname usaram a economia circular e os 3R's (reduzir, reciclar e reutilizar) em atividades específicas da sociedade como, por exemplo, a gestão de resíduos (Ghisellini *et al.*, 2016).

Este conceito pretende aumentar os fluxos de materiais reciclados e, ao mesmo tempo, equilibrar o crescimento económico com a exploração de recursos sem prejudicar o meio ambiente (Winans *et al.*, 2017). Por exemplo, a União Europeia sabendo que gera 2,5 mil milhões de toneladas de resíduos anuais, a partir de 2015, modernizou a legislação relacionada com a gestão de resíduos, de modo a promover a mudança de uma economia linear para uma circular (PE, 2015). Mesmo assim, a comunidade europeia desperdiça 600 milhões de toneladas de resíduos que poderiam entrar no ciclo da reciclagem e da reutilização e, conseqüentemente, reduzir o consumo de matérias primas naturais (EY-AM&A e 3Drivers, 2018).

A utilização dos recursos em modo linear (extração, utilização, aterro) e o crescimento da população provocaram um aumento no consumo de matérias-primas, que, por vezes, são raras e limitadas, bem como, a dependência de alguns países da União Europeia relativamente a estas substâncias. Ou seja, a carência de matérias-primas tem levado ao aumento do consumo de energia e das emissões de CO₂ no meio ambiente (PE, 2015). Se a economia linear continuar ativa, a disponibilidade dos recursos (combustíveis fósseis, matérias-primas, água e solo) será reduzida e, além disso, os custos das matérias primas continuarão a aumentar. Por exemplo, entre 2000 e 2014, o custo da borracha e do metal aumentou de 260% e 140%, respetivamente, com brutais impactos na economia. Também as alterações ambientais continuarão agravar-se e, por fim, as despesas da economia tenderão a crescer, nomeadamente, nos sectores da mobilidade, alimentação e construção com práticas lineares que consomem 7,2 triliões de euros por ano (COTEC, 2016b). Em sentido oposto, o *ecodesign* e a prevenção e reutilização de resíduos pode gerar uma faturação suplementar de 600 biliões de euros na economia europeia (Kalmykova *et al.*, 2018).

Em sentido oposto, surge o conceito de economia circular que pretende substituir o atual modelo linear e alterar as práticas económicas da sociedade (Leitão, 2015; Lemos, 2018). No espaço europeu, a economia circular tem procurado afirmar-se através da adoção de várias estratégias, nomeadamente, o aumento das taxas de reciclagem, a manutenção do valor de materiais valiosos, a criação de emprego, o crescimento económico, a criação de novos modelos de negócio, do design ecológico às simbioses industriais, e a redução da emissão dos gases de efeito de estufa e dos impactos ambientais (Bocken *et al.*, 2016).

De uma forma simplificada, o conceito alternativo pretende replicar o processo produtivo da natureza e a ideia do Antoine Lavoisier, em que “*Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma*” (Lemos, 2018).

De acordo com o plano de ação da União Europeia, a economia circular mantém o valor dos produtos e materiais pelo maior tempo possível. Os resíduos e os recursos são minimizados e, no fim de vida, os recursos entram novamente no processo produtivo. (Houston *et al.*, 2018).

A economia circular pode funcionar como um meio alternativo na produção de bens e serviços do modelo linear, ou seja, a alternativa passa pela transformação dos resíduos (*reutilização, recuperação ou reciclagem*) em potenciais subprodutos ou em outras matérias-primas, referidas como alternativas ou secundárias. Deste modo, o desperdício será reduzido ao mínimo e as operações de transformação não se limitam às ações de gestão de resíduos e de reciclagem. Assim, a aplicação começa no redesenho de processos, produtos e estende-se a novos modelos de negócio até à otimização da utilização de recursos (BCSD, 2017; eco.nomia, 2019; PE, 2015).

O campo de aplicação não se restringe apenas à gestão de resíduos e aos processos produtivos, ou seja, aplica-se a todas as áreas económicas da sociedade, de modo a reduzir o desperdício em todas as fases produtivas como, por exemplo, a utilização de biomassa, uso dos solos, da água e na produção da energia (Lemos, 2018). A nível industrial têm sido propostos vários conceitos para reduzir os danos no meio ambiente, como o “*cradle to cradle*”, o biomimetismo e a ecologia industrial (EY-AM&A e 3Drivers, 2018).

A economia circular é uma estratégia de promoção do desenvolvimento sustentável através da reintrodução dos materiais no ciclo produtivo, por meio da reutilização, reciclagem, reparação e reciclagem. Esta prática aumenta a eficiência no uso e gestão de recursos, bem como a sustentabilidade do planeta e o bem estar (COTEC, 2016b). A vertente económica estimula o uso competente e a eficiência dos recursos, através de soluções apoiadas na desmaterialização, reutilização, reciclagem e recuperação dos materiais. Desta forma, pretende-se extrair valor económico e proveito dos materiais, equipamentos e bens por um maior período de tempo e pela utilização de energia proveniente de fontes renováveis (República Portuguesa: Ambiente, 2017).

O conceito introduz uma nova visão sobre o ecossistema industrial, onde o crescimento económico é dissociado do consumo de recursos e das emissões poluentes, e onde os

materiais em fim de vida são concebidos como recursos e não como resíduos. Deste modo, é necessário fechar o ciclo de materiais e, ao mesmo tempo, reduzir as matérias-primas e a deposição de resíduos em aterro (Elia *et al.*, 2017).

Durante a aplicação do conceito de economia circular (Figura 1), as operações de reutilização, remanufatura e reparação consomem menos recursos e energia e são mais económicas do que a reciclagem convencional (matérias-primas de baixa qualidade), além disso, a duração do valor dos recursos deve ser maximizada. Após a utilização dos materiais, as melhores práticas de recuperação enquadram-se nas soluções de reutilização, remodelação e reparação, vindo depois as práticas de remanufatura e de reciclagem tradicional e, por fim, a incineração e a deposição em aterro como últimas opções de valorização (Korhonen *et al.*, 2018).

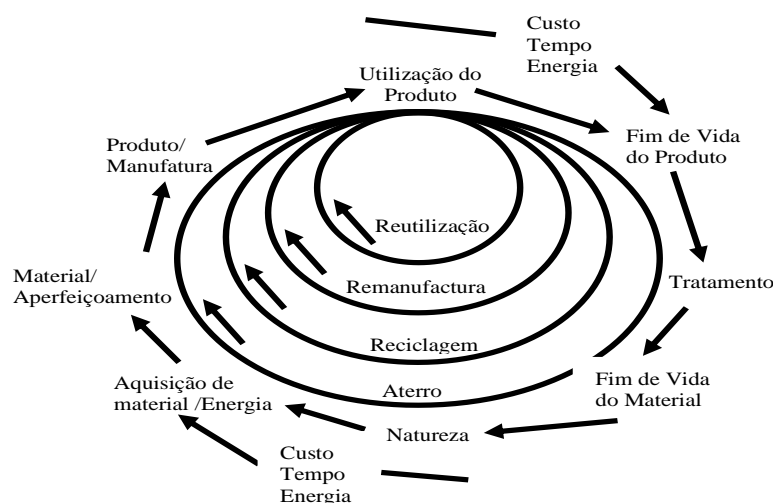


Figura 1. Aplicação do conceito de economia circular (Korhonen *et al.*, 2018).

De acordo com a Fundação *Ellen MacArthur*, a economia circular encoraja o desinvestimento da atividade económica no consumo de recursos não renováveis e na eliminação dos resíduos do sistema. Ao mesmo tempo, o sistema industrial fica dependente do uso de energias renováveis, e elimina ou reduz a utilização de químicos tóxicos. Também o processo produtivo é redesenhado, de modo a incorporar o resíduo como matéria-prima (Ellen Macarthur Foundation, 2013).

A economia circular assenta em três princípios básicos (COTEC, 2016b; Ellen MacArthur Foundation, 2017; República Portuguesa: Ambiente, 2017):

- “Preservar e melhorar o capital natural controlando stocks finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis”. Este princípio começa na conceção de produtos,

serviços e modelos de negócio que reduza a produção de resíduos e a poluição no sistema natural.

- “*Otimizar o rendimento de recursos através da circulação de produtos, componentes e materiais em uso, dando-lhes o mais alto nível de utilidade pelo maior período de tempo possível, tanto no ciclo técnico como no biológico.*” Este princípio abrange a durabilidade do produto, ou seja, o valor e o tempo de utilização devem ser assegurados pela maior duração.
- “*Estimular a efetividade do sistema revelando e desenhando as externalidades negativas*”. Este princípio incentiva a regeneração dos materiais utilizados e dos sistemas naturais comuns.

A Norma *BSI 8001:2017 – Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations. Guide* identifica 6 princípios da economia circular: sistemas de pensamento, inovação, administração, colaboração, valor otimizado e transparência, como se pode ver na Figura 2 (BSI, 2017a). Além disso, o conceito é definido pela capacidade regenerativa e restauradora por projeto e por prolongar o valor (financeiro ou não financeiro) e o ciclo de vida dos produtos, componentes e materiais. A capacidade restauradora refere-se à transformação dos recursos gastos em novos produtos, enquanto a capacidade regenerativa refere-se à aptidão dos sistemas a recuperar e renovar os recursos consumidos (BSI, 2017b; Pauliuk, 2018).

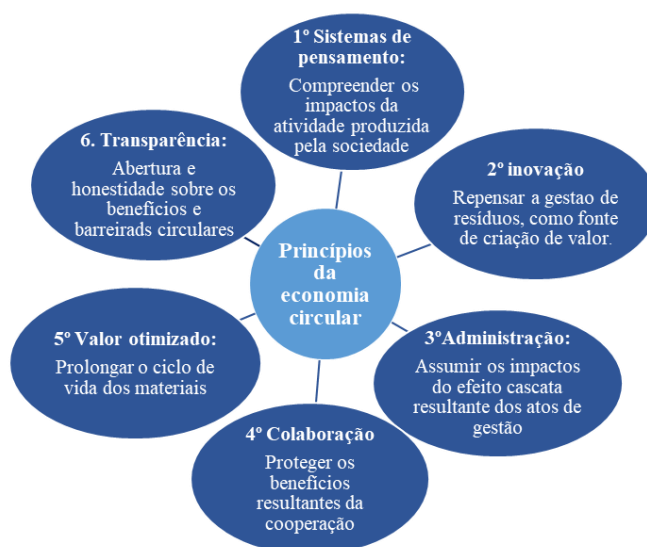


Figura 2. Princípios da economia circular (BSI, 2017a).

O desenvolvimento de produtos num contexto de economia circular abrange cinco áreas: entrada de materiais, design, produção, consumo e gestão de recursos em fim de vida. Esta última fase envolve o fornecimento de recursos que entram na fase de entrada de materiais, de modo a fechar o ciclo.

Após a aplicação surgem quatro possíveis fontes de criação de valor que não existem no modelo de produção linear (Elia *et al.*, 2017; EY-AM&A e 3Drivers, 2018), como se pode ver também pela Figura 3:

- “*Poder do ciclo fechado*” – Este efeito relaciona-se com a redução de materiais e recursos. Quando o objetivo anterior é cumprido, o círculo torna-se mais curto e, conseqüentemente, existe uma redução nas transformações, nos consumos (energia, trabalho, capital, etc.), nas externalidades negativas e no tempo associado à reutilização. O modelo de “*leasing*” do equipamento de escritório (fotocopiadora, mobiliário, etc.) é um bom exemplo desta abordagem.
- “*Poder de resiliência do ciclo*” – Esta criação de valor depende da produtividade que está ligada à resiliência, ou seja, depende do número de ciclos de reutilização e reciclagem, bem como da duração de cada ciclo (especialmente na fase de utilização/consumo). Por exemplo, se aumentar o número de recauchutagens de pneus ir-se-á poupar metade dos gastos de produção de um pneu novo e, ao mesmo tempo, só se tem uma redução de 10% no desempenho original.
- “*Poder de uso em cascata*” – A fonte de valor dependerá da multiplicidade de utilizações encontradas ao longo do ciclo de vida, isto é, quando se aplica em diferentes áreas de aplicação e, também, são degradáveis na biosfera. Um bom exemplo são os desperdícios de algodão na cadeia de valor do vestuário através da aplicação em enchimento no estofamento ou isolador na indústria da construção.
- “*Poder dos ciclos puros*” – Se as qualidades e as propriedades técnicas do material forem mantidas ao longo dos ciclos, a longevidade e a produtividade crescerá ao longo do tempo. Uma maneira de facilitar o fecho do ciclo será a criação de um produto que tenha uma estratégia de desmontagem. Caso, os materiais mantenham as características idênticas às matérias virgens será facilitador para outras aplicações.

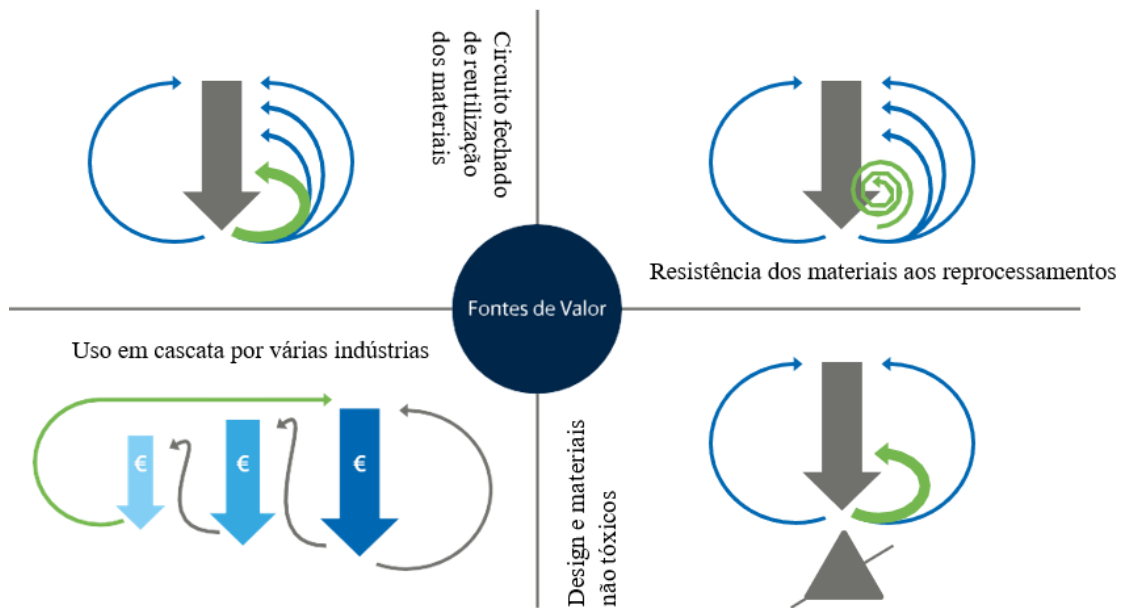


Figura 3. Diferentes formas de criação de valor na economia circular (EY-AM&A e 3Drivers, 2018).

Em economia circular, o termo “*fecho do ciclo*” atua em toda a cadeia de valor, nomeadamente, na etapa de conceção e design, distribuição, utilização e eliminação. A primeira fase envolve a conceção de produtos e serviços em diferentes ciclos de vida e viáveis em termos financeiros e ecológicos, através da redução no consumo de recursos e no aumento do tempo de vida útil do produto. No caso da produção, deve-se procurar processos mais “limpos”, através da redução de substâncias tóxicas e, em sentido oposto, aumentar a eficiência energética e o consumo de subprodutos. Depois, a etapa da distribuição deve ser partilhada e os meios de transporte devem ser sustentáveis. E, também deve-se reduzir na ação de embalagem e usar materiais que sejam recicláveis. Na penúltima etapa deve-se aumentar o tempo de vida útil do produto e otimizar a reparação e a reutilização. Por fim, a eliminação ou reentrada no ciclo consiste na promoção de redes de retoma, reuso, remanufatura ou reciclagem (Eco.nomia, 2019). Na Figura 4 mostra-se o diagrama de funcionamento da solução alternativa ao modelo linear.

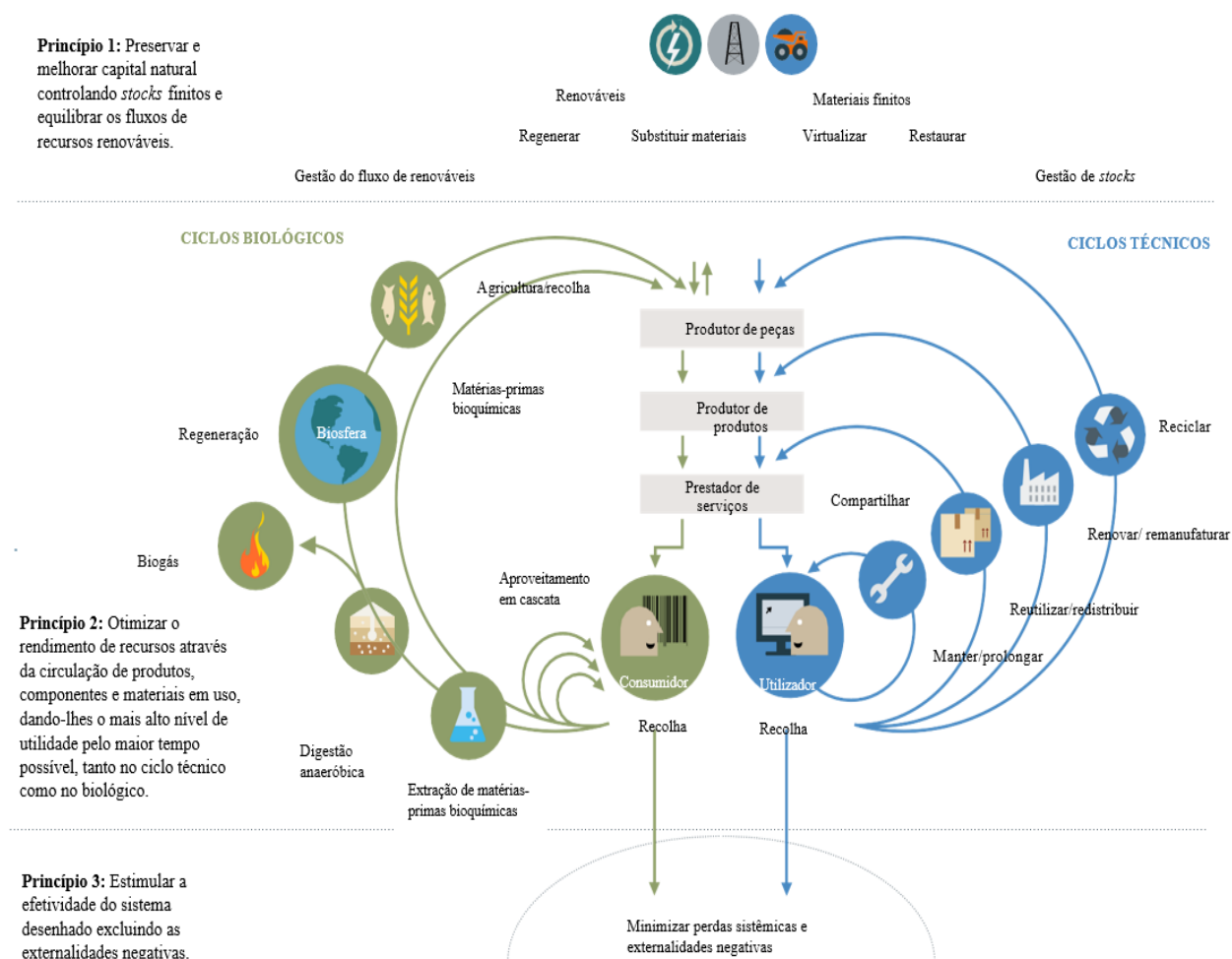


Figura 4. Representação do modelo de funcionamento da economia circular (COTEC, 2016b; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

A Fundação *Ellen MacArthur* identificou quatro blocos (*building blocks*), nomeadamente, o design de produtos e produção circular, os novos modelos de negócio, os ciclos reversos e os fatores viáveis para alterar os modelos lineares em modelos circulares e, também, criá-los (COTEC, 2016b; Eco.nomia, 2019; Elia *et al.*, 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

A principal característica da economia circular reside na capacidade de ser restaurativa e regenerativa por natureza. Deste modo, o tratamento de materiais e produtos não é realizado apenas no fim de vida, mas desde a conceção do produto (design). Durante a fase de eco conceção, deve-se escolher produtos e processos com menor consumo em recursos, através da utilização de materiais renováveis e não perigosos e matérias-primas recuperadas. Também as soluções (desmontagem, recuperação, reaproveitamento e triagem) para o fim

de vida devem ser antecipadas nesta etapa (COTEC, 2016b; Eco.nomia, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

No caso dos novos modelos de negócio existem 4 propostas de valor: - Uma proposta de valor passa pela transformação de produtos em serviços, ou seja, os produtos são vistos como serviços e os consumidores como arrendatários. A segunda proposta consiste na recuperação e acondicionamento dos seus produtos após utilização e, que depois são colocados no mesmo produto. Na terceira, como alguns produtos não podem ser restaurados na sua totalidade, são transformados noutros produtos. Por fim, a quarta proposta passa pelo desenvolvimento de novas tecnologias na área da reciclagem para se produzir produtos de alta qualidade e sustentáveis (COTEC, 2016b; Eco.nomia, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

O terceiro bloco, o de ciclo reverso, consiste na devolução e manutenção do valor do material usado à origem para novos ciclos de utilização. Contudo, a variedade de produtos e materiais obrigará ao desenvolvimento da logística de entrega, triagem, armazenagem, gestão de risco, energia, biologia e química (por exemplo, as simbioses industriais e uso de materiais em cascata). Porém, a diminuição na perda de materiais e o aumento da circularidade é conseguido através dos sistemas de recolha, de tratamento com custo-eficiente e ótima qualidade, bem como, uma melhor segmentação de produtos em fim de vida (COTEC, 2016b; Eco.nomia, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2013).

Por fim, a aplicação dos fatores de viabilidade contribuirá para uma redução dos impactos, e um crescimento dos ciclos de utilização e de eficiência dos recursos. As áreas (educativas e financeiras), plataformas colaborativas, e alteração no sistema fiscal e nas métricas económicas pode funcionar como condições viáveis e a área educativa pode atuar na mudança de pensamento individual e coletivo da inovação circular. Além disso, os governantes devem promover a integração da economia circular e do pensamento sistémico nos diferentes programas de ensino. Enquanto na área financeira, os diferentes agentes da cadeia de valor devem ter acesso a ferramentas de financiamento e gestão de risco, deste modo os modelos de negócio inovadores podem ter proteção dos governos. No caso das plataformas colaborativas, a implementação de um sistema circular de larga escala depende da colaboração efetiva entre os diferentes *stakeholders*. A informação pode ser variada como, por exemplo, as parcerias no desenvolvimento de produtos, sistemas de recolha partilhados, e incentivos alinhados e mecanismos de identificação de possíveis parceiros.

Por fim, a mudança no sistema fiscal e nas métricas económicas pode ajudar na mudança de paradigma económico (linear para circular) através da transferência de incentivos fiscais dos recursos para a mão-de-obra, e mantendo as métricas atuais, mas adicionando métricas para medir o *stock* total de ativos de um país (COTEC, 2016b; Eco.nomia, 2019; Elia *et al.*, 2017; Ellen MacArthur Foundation, 2013)

O fecho do ciclo socioeconómico e o fecho de ciclo ecológico são duas estratégias da economia circular para se atingir uma maior sustentabilidade. O fecho do ciclo socioeconómico é realizado pela entrada de materiais secundários provenientes da reciclagem de resíduos, enquanto o fecho do ciclo ecológico é realizado pela entrada de energia renovável. Quando o consumo de recursos naturais, resíduos e emissões for reduzida, o benefício aparece na diminuição da pressão sobre o meio ambiente exercido pelo metabolismo da sociedade (Mayer *et al.*, 2019).

Durante a transformação dos modelos de negócio circulares aparecem constrangimentos, fatores potenciadores e possíveis soluções nas empresas, como se pode ver na Tabela 1.

Tabela 1. Constrangimentos, fatores facilitadores e possíveis soluções nos modelos de negócio (Houston *et al.*, 2018)

| Barreiras | Fatores potenciadores |
|--|---|
| Financiamento de novos modelos de negócio aliado a sistemas tributários. | Ecossistemas inovadores, parceiros e colaboração entre os <i>stakeholders</i> e competidores. |
| Resistência à mudança. | Normalização em toda a cadeia de valor |
| Falta de perceção na procura pelos consumidores. | Efeitos indiretos das corporações internacionais na oferta local. |
| Preço dos recursos e considerações financeiras. | Visão partilhada e certificação. |
| Falta de economia de escala. | Preço dos recursos. |
| Desalinhamento nas metas das empresas e da sociedade. | Preferências emergentes. |
| Visão limitada nas oportunidades de negócio. | Infraestrutura, redes. |
| Concorrência e qualidade. | Possíveis soluções |
| Falta de um mercado para materiais alternativos. | Melhor compreensão no valor dos produtos e dos materiais. |
| Projeto linear atual dos produtos. | Melhor terminologia. |
| Falta de infraestrutura. | Envolver toda a cadeia de valor. |
| Conveniência e preços. | Melhorar os preços. |
| Falta de conhecimento entre indústrias. | Suportar a inovação. |
| Falta de informação técnica sobre reutilização e reparações. | Desenvolver infraestrutura e redes. |
| Consciência e <i>know-how</i> . | Melhorar a gestão de estratégias e de planos. |

A cadeia de valor da economia circular pode dividir-se em nove áreas, nomeadamente, pesquisa de materiais, projeto, produção, distribuição e vendas, consumo e utilização, recolha e aterro, reciclagem e recuperação, remanufatura e entradas circulares. Todas as áreas da cadeia trabalham num ciclo fechado de fluxo de materiais e de energia renovável e algumas destas áreas podem adotar estratégias de partilha, remanufatura e entradas de materiais circulares na área do consumo e uso, da remanufatura e das entradas circulares, respetivamente. Os recursos que entram na área da entrada circular são materiais recuperados e possuem vários ciclos de vida (Kalmykova *et al.*, 2018). Na Figura 5 mostra-se o ciclo fechado da cadeia de valor da economia circular.

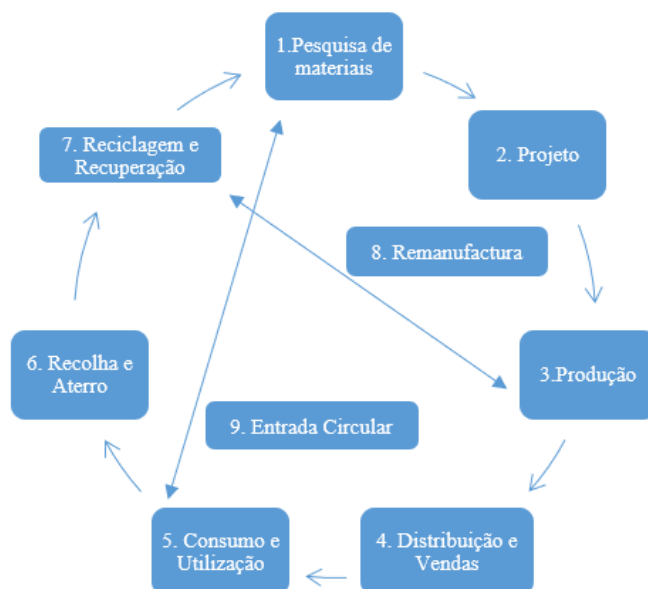


Figura 5. Áreas da cadeia de valor da economia circular (Kalmykova *et al.*, 2018).

No trabalho elaborado por (Kalmykova *et al.*, 2018), criaram uma definição para economia circular através da perspetiva do desenvolvimento sustentável. Assim, a economia circular é baseada nos sistemas de produção-consumo da sociedade e, ao mesmo tempo, os sistemas de produção são otimizados pelo fornecimento linear de materiais (natureza-sociedade-natureza) e pelo fluxo de produção de energia. O abastecimento dos sistemas de produção resulta dos fluxos de materiais cíclicos, fontes de energia renováveis e fluxos de energia em cascata. Na Tabela 2 mostra-se as vantagens da economia circular na ótica da dimensão social, económica e ambiental do desenvolvimento sustentável.

Tabela 2. Vantagem económica, ambiental e social resultante da aplicação da economia circular
(Korhonen *et al.*, 2018).

| Bónus ambiental | Bónus económico | Bónus social |
|---|--|---|
| Redução de materiais virgens e entradas de energia. | Redução de custos de energia e matérias-primas. | Criação de emprego, através da criação de novas aplicações. |
| Ciclo de vida das entradas virgens é maioritariamente maior. | Valor dos recursos é prolongado várias vezes. | Crescimento no sentido da comunidade (cooperação e participação) da partilha económica. |
| Redução de resíduos e de emissões. | Custo de recursos escassos é minimizado. | Partilha a função e serviço de um produto físico em vez de possuir e consumir o produto físico. |
| Os recursos dos sistemas de produção-consumo tem vários ciclos de vida. | Redução de custos de agravamento resultantes da legislação ambiental, taxas e seguros. | |
| Combustíveis neutros em CO ₂ são renováveis e seus resíduos são nutrientes que podem ser usados na natureza. | Benefício na marca e na entrada de novos mercados (por exemplo, o mercado verde. | |
| | Redução nas perdas e fugas. | |
| | Redução nas operações de gestão de resíduos. | |
| | Redução de custos das emissões controladas. | |
| | Novos mercados para comercializar recursos. | |

Atualmente, 10000 toneladas de resíduos indiferenciados na incineração e no aterro produzem 1 e 6 posto de trabalho, respetivamente, enquanto, a reciclagem e a reutilização criam 36 e 296 postos de trabalhos, respetivamente (República Portuguesa: Ambiente, 2017). Além disso, a aplicação de medidas preventivas no âmbito dos resíduos e divulgação do design ecológico ou da reutilização pode contribuir em poupanças líquidas no valor de 600 mil milhões de euros (8% do volume de negócios anual) para empresas instaladas na União Europeia e redução das emissões anuais totais de gases com efeito de estufa entre 2 e 4%. Também, o emprego sairia beneficiado em 580 000 postos de trabalho no espaço europeu e os consumidores utilizariam produtos mais duradouros e inovadores (PE, 2015).

As vantagens da economia circular surgem ainda na promoção da eco-inovação, criação de novas oportunidades e novos modelos de negocio, manutenção dos produtos, materiais e recursos na economia pela duração maior possível, com redução da dependência dos combustíveis fósseis, minimização de resíduos, conservação do capital natural, diminuição das emissões de carbono e contribuição no combate às alterações climáticas (BCSD, 2017).

Quando se aumenta a circularidade na economia, os benefícios aparecem na redução dos impactos ambientais e no uso de recursos, na poupança do custo do uso eficiente de recursos

e na criação de novos mercados, com vantagens económicas decorrentes das práticas circulares, por exemplo, a criação de emprego e riqueza. No período de transição (linear para circular), os benefícios aparecem na poupança de custos com matérias-primas, na diminuição da volatilidade dos preços dos materiais e na redução de ruturas de materiais. Além disso, existe a criação de novos postos de trabalho através do crescimento de atividades de aluguer e serviços de partilha de recursos, bem como redução da pressão ambiental das atividades económicas (EY-AM&A e 3Drivers, 2018; República Portuguesa: Ambiente, 2017).

A economia circular contribui para objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) e oito ODS são ajudados pela economia circular, como se pode ver na Tabela 3.

Tabela 3. Contribuição da Economia circular nos ODS (Thelen *et al.*, 2018).

| ODS | Contribuições da economia circular |
|---|---|
|  3 Saúde de qualidade | Evita e remove substâncias perigosas dos ciclos de uso de materiais e liberta a economia de contaminações e, ao mesmo tempo, permite a reciclagem sem riscos para a natureza e saúde humana (por exemplo, a eliminação gradual do amianto ou uso de tintas com chumbo). |
|  6 Água potável e saneamento | Maioria dos princípios da economia circular sobre reutilização, reciclagem de materiais, eficiência de recursos e simbioses industriais são aplicáveis à água, aumentando a qualidade e acessibilidade de água potável. |
|  7 Energias renováveis e acessíveis | Soluções de energia circular resultam em menor procura de energia. Compartilha de energia através da energia geotérmica, aumenta a capacidade de armazenamento. Além disso, uso de fontes de energia renováveis altera os padrões de consumo e estimula o uso de energia limpa. |
|  8 Trabalho digno e crescimento económico | Criação de novos modelos de negócio geram novas empresas e oportunidades de emprego. Os negócios assentes num modelo circular requerem mais mão-de-obra do que os modelos lineares. Além disso, algumas economias emergentes necessitam de condições de trabalho seguras e remunerações dignas. |
|  9 Indústria, inovação e infraestruturas | A inovação requerida pela economia circular, no ambiente construído, não se foca apenas nas inovações industriais ou técnicas, mas aborda, também, as inovações de infraestrutura. Assim, a economia circular será uma solução para tornar a indústria mais sustentável e resiliente à escala global e local. |
|  11 Cidades comunidades sustentáveis | Economia circular centra-se na produção local, reparação, <i>leasing</i> , contactos entre produtor e consumidor. Assim, as cidades necessitam de adaptações, de modo a serem aplicados os objetivos propostos pela economia circular. |
|  12 Produção e consumos sustentáveis | Economia circular pretende aumentar o tempo de vida útil dos produtos e das matérias primas alternativas, de modo a diminuir o consumo de materiais virgens e eliminar a obsolescência dos produtos. |
|  13 Ação climática | Economia circular pode contribuir na diminuição dos gases de efeito de estufa através da substituição da matérias-primas virgens pelas matérias-primas alternativas. Na maioria das vezes, a extração dos materiais virgens requer mais energia do que os materiais alternativos. Além disso, a produção de energia verde e a gestão da água são a chave da mitigação e adaptação às alterações climáticas. |

Ao nível europeu, os benefícios podem ocorrer no crescimento económico e no meio ambiente. O crescimento económico é promovido pela criação de novos modelos de negócio

e oportunidades de emprego, bem como, a poupança de recursos através do fornecimento equilibrado de materiais e dos custos de aquisição. Enquanto que, no meio ambiente, os impactos ambientais e os gases de efeito de estufa são reduzidos (Kalmykova *et al.*, 2018).

Ao nível empresarial, os benefícios surgem na produtividade dos recursos e, conseqüentemente, as empresas tornam-se mais competitivas. Na análise competitividade-custo, os gastos podem ser reduzidos pela disponibilidade e previsibilidade no fornecimento de matérias-primas. Além disso, no imediato existem ganhos financeiros, enquanto a longo prazo existem ganhos estratégicos devido ao aumento do custo das matérias-primas e da volatilidade (EY-AM&A e 3Drivers, 2018).

Os benefícios da economia circular podem agrupar-se ao nível micro ou macro. A nível micro aparecem os benefícios de poupança de custos, novas fontes de inovação e de receita, relacionamento aprimorado entre clientes e maior resiliência nas organizações. Enquanto que as vantagens a nível macro ocorrem no crescimento económico, nas oportunidades de emprego, na preservação do recursos naturais e mitigação das alterações climáticas, e na redução da dependência de matérias-primas (BSI, 2017b; Pauliuk, 2018).

A implementação da economia circular pode ser feita através da adoção de medidas, que se enquadrem na otimização de stocks, na eco-eficiência, na redução de resíduos e através da política dos 4R's (Kalmykova *et al.*, 2018).

A economia circular apresenta vários desafios, nomeadamente, às indústrias que adotem novos modelos circulares. Estas necessitam de analisar os seus resíduos ou subprodutos, de modo a transformá-los em recursos (internos ou externos). No entanto, essa valorização deve cumprir a legislação em vigor (Molina-Sánchez *et al.*, 2018).

2.1.2. Limitações da economia circular

O conceito da economia circular relaciona-se com o conceito da sustentabilidade mas, também, existem diferenças na origem dos termos, nos objetivos e na motivação, na prioridade do sistema, nos beneficiários e nas responsabilidades (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

O desenvolvimento da económica circular leva ao aparecimento de limitações ou desafios que dependem dos princípios associados (*ecodesign*, redução, reutilização, reciclagem, reclassificação de materiais, nutrientes e energias renováveis) (Kirchherr *et al.*, 2017). Na Tabela 4 identifica-se os princípios e limites ou desafios associados ao

desenvolvimento da economia circular. Os diferentes *stakeholders* que intervêm na cadeia de valor necessitam de mudar e adaptar as suas formas de atuação do modelo linear para o modelo circular do ambiente construído.

Tabela 4. Principais limites e desafios do desenvolvimento da economia circular (Ghisellini *et al.*, 2016).

| Princípio da economia circular | Limites ou desafios |
|---|--|
| Design | Cenário ótimo de vida útil do produto. |
| | Design para desmontagem, reutilização e reciclagem. |
| | Design para produtos duráveis. |
| | Design para o novo modelo de negócios de consumo. |
| Redução | Superar o efeito do ricochete nas estratégias de eco-eficiência e eco suficiência. |
| Reutilização | Reutilização máxima técnica de materiais. |
| | Aumento da exigência do consumidor em relação à reutilização de produtos e materiais. |
| | Desenvolvimento de mecanismos de retoma das empresas. |
| | Garantir o reparo e o uso secundário dos produtos após o uso original. |
| Reciclagem | Tributação baseada em energia não renovável, em vez de mão-de-obra e energia renovável. |
| | Reforço dos mercados locais de materiais reciclados. |
| | Riscos do comércio global de materiais. Resíduos de plástico: inviabilidade devido à mistura de contaminantes. |
| | Celulose: viável até 4-6 vezes. |
| | Metais raros (falta de economias de escala). |
| | Desperdício de alimentos: outras transformações antes de serem utilizadas exigem altos custos em pesquisa e desenvolvimento. |
| Modelagem apropriada da ACV para reutilização e reciclagem. | |
| Reclassificação dos materiais | Reutilização depois do primeiro ciclo. |
| Nutrientes | Retorno seguro à Biosfera ou em uma cascata de usos subsequentes (biorrefinaria). |
| Energias renováveis | Aumentar sua participação em comparação com a participação de combustíveis fósseis. |

Cada interveniente da cadeia de valor terá barreiras e fatores a ultrapassar, como se pode ver na Tabela 5. As barreiras identificadas (Tabela 5) estão relacionadas entre si, no entanto, a mudança cultural segue a mudança do mercado e é estimulada pela regulamentação. A falta de mecanismos, no mercado, que favoreçam as soluções circulares em vez das lineares são a principal barreira à mudança. Além disso, a legislação restringe a implementação de novas soluções à escala industrial e a indústria, numa fase inicial, analisa os custos das soluções circulares. O desempenho e a disponibilidade das matérias-primas alternativas são fatores críticos para criar modelos de negócio e reduzir os custos de exploração (Thelen *et al.*, 2018).

Tabela 5. Barreiras e fatores associados à economia circular (Thelen *et al.*, 2018).

| Barreiras | Fatores |
|--|---|
| Cultura e Crenças, | Cultura da empresa. |
| | Relutância em colaborar na cadeia de valor devido a questões competitivas, culturais e colaborativas. |
| | Relutância dos consumidores para adquirir materiais ou produtos usados ou pagar um preço justo. |
| Legislação | Conforto de trabalhar num ambiente conhecido (sistema linear) e desconfiança dum ambiente novo (economia circular). |
| | Compromissos limitado para “contratos verdes”. |
| | Leis, regulamentos e especificações técnicas que não englobam as inovações necessárias para uma economia mais circular. |
| Mercado | Atrasos na autorização de processos. |
| | Falta de entendimento entre as diferentes instituições governamentais. |
| | Baixo custo das matérias-primas virgens. |
| | Circularidade não é usada na avaliação de ativos. |
| | Melhor compreensão dos riscos envolvidos na economia linear do que na economia circular. |
| Tecnologia e educação | Investimento inicial elevado em produtos inovadores ou na mobilização do <i>design</i> integrado. |
| | Subsídios limitados ou incentivos de mercado para materiais ou produtos secundários. |
| | Falta de mercado ou economia de escala para novos produtos circulares. |
| | Colheita e fornecimento de produtos remanufaturados. |
| | Experiência limitada no design circular do ambiente construído. |
| Informação | Falta de projetos de demonstração em escala industrial e de experiência em novas tecnologias. |
| | Partilha de informações sobre a disponibilidade, qualidade e localização de materiais circulares. |
| | Falta de dados sobre a pegada ambiental e desempenho técnico. |
| | Atenção limitada à economia circular nos estudos de arquitetura e de projeto. |
| | Falta de programas educacionais sobre o pensamento circular para os diferentes intervenientes da sociedade. |
| | Comunicação limitada sobre circularidade. |
| | Falta de partilha de conhecimento no mundo físico. |
| | Partilha limitada das melhores práticas no ambiente construído e transposição para contextos diferentes. |
| Falta de tempo ou capacidade para os diferentes intervenientes do mercado formações sobre os benefícios e abordagem à economia circular. | |
| Diferentes níveis de conhecimento e consciencialização na cadeia de valor. | |
| Falta de consciencialização dos consumidores e investidores na economia circular. | |

Várias visões sobre a economia circular defendem o uso pleno de energia renovável na produção de produtos e da reciclagem para obtenção de novas matérias-primas, no entanto, esta visão torna-se incompatível com a produção de energia, ou seja, três quartos da energia resulta da queima de fontes não renováveis e o meio ambiente fica desequilibrado por não conseguir absorver as emissões provenientes da queima (Kalmykova *et al.*, 2018). Na Tabela 6 identifica-se os limites e os desafios da economia circular.

Tabela 6. Limites e desafios da economia circular (Korhonen *et al.*, 2018).

| Limite | Problema |
|---------------------------|--|
| Termodinâmico | Sistemas cíclicos consomem recursos e criam resíduos e emissões. |
| Fronteira do sistema | Espacial: problemas são alterados ao longo do tempo. |
| | Temporal: uso de recursos não renováveis a curto prazo pode constituir um benefício a longo prazo. |
| Escala física da economia | Efeito de ricochete e bumerangue e paradoxo Jevon's. |
| Mudança | Primeiras tecnologias mantêm sua posição de mercado apesar da incapacidade. |
| Governança e gestão | Gestão intra-organizacional e intra-sectorial dos fluxos físicos inter-organizacionais e intersectoriais de materiais e energia. |
| Social e cultural | Termo “resíduo” tem um forte impacto no manuseio, gestão e utilização. |
| | Conceito de resíduo é formado num determinado contexto cultural, social e temporal, no entanto, o conceito é evolutivo. |
| | Conceito tem uma formação cultural e social. |

Durante a transição para a economia circular, os rendimentos não serão distribuídos de forma equitativa, ou seja, alguns setores industriais, empresas, regiões, e grupos sociais, podem perder benefícios, enquanto os outros intervenientes poderão receber benefícios. Por exemplo, os empregados das indústrias que produzem materiais virgens ou bens de consumo de baixa qualidade podem ser despedidos pela falta de trabalho (Reichel *et al.*, 2016).

Uma economia mais circular não depende apenas do crescimento das taxas de reciclagem, mas também depende da redução na extração de recursos e no consumo. Algumas atividades de reciclagem necessitam de mais energia e materiais. Por vezes, os materiais resultantes da reciclagem requerem mais energia do que as matérias-primas tradicionais, tornando-se num outro problema (Mayer *et al.*, 2019).

2.1.3. Indicadores de circularidade

A implementação da economia circular pode ser medida através de indicadores ao nível micro, meso e macro. Os indicadores do micro-nível avaliam-se em organizações, produtos e consumidores, enquanto os indicadores do grupo meso medem-se em parques eco-industriais e em simbioses industriais. Por fim, os indicadores do conjunto macro calculam-se ao nível de cidades, regiões ou países (Pauliuk, 2018).

Na economia circular, não existe apenas um indicador para a sua medição, contudo os existentes podem ajudar a monitorizar o desempenho em diversas áreas (diretamente ou indiretamente) para se avaliar o desenvolvimento da economia. Os indicadores podem ser agrupados em gestão dos recursos sustentáveis, comportamento social e operações de

negócio (CE, 2019a). Na gestão de recursos sustentáveis, os resultados dos 28 países da União Europeia são contabilizados no indicador da pegada ecológica através do consumo interno de materiais (CIM), da produtividade de recursos, e da produção e da reciclagem de resíduos sólidos domésticos (CE, 2019b). Por outro lado, o comportamento social avalia a sensibilização dos cidadãos e a participação na economia circular como, por exemplo, quem escolhe alternativas para comprar novos produtos ou o número de empresas e emprego na reparação de computadores e bens pessoais e domésticos no espaço europeu (CE, 2019c). Por fim, as operações de negócios avaliam a mudança nos modelos de negócio para uma economia mais verde, através da análise da dificuldade de implementação, da fonte de financiamento, da disponibilidade de informação que pode ajudar no acesso ao financiamento, das simbioses industriais que permitem a reciclagem de produtos em fim de vida e da extensão do ciclo de vida pela inovação (CE, 2019d).

De acordo com o trabalho elaborado por An, Maarten e Veronique (An *et al.*, 2018), os indicadores agrupam-se em nível macro, meso e micro. Os indicadores macro apoiam a tomada de decisão na área económica, comercial, da política ambiental, do desenvolvimento sustentável, do plano de ação e da gestão nacional de resíduos e da política de conservação de recursos. Por exemplo, os indicadores macroeconómicos descrevem as características comerciais de um país ou região e permitem comparar com outros países. Enquanto, os indicadores meso focam-se na indústria, na atividade consumista ou num material particular, de modo a identificar resíduos de materiais, fontes de poluição e oportunidades para eficiência em determinados sectores ou em domínios de consumo. No caso dos indicadores meso económicos, estes descrevem o desempenho ambiental, social e económico duma região, dum grupo de produtos e duma indústria. Por fim, os indicadores micro fornecem informação detalhada na tomada de decisão de determinado negócio, de substância específica ou de produtos individuais. Também suportam a implementação de políticas e decisões na área da política de produto, da eficiência energética e da gestão integrada de resíduos.

Primeiro determina-se o valor quantitativo do indicador, depois o resultado pode ser relacionado com o resultado económico, os dados *per capita*, os indicadores de entrada e saída, e os indicadores de consumo. Por vezes, existem exceções. (An *et al.*, 2018). Na Tabela 7 apresenta-se os indicadores para avaliar a evolução da economia circular.

Tabela 7. Indicadores para monitorizar a economia circular (An *et al.*, 2018).

| Indicadores |
|--|
| Consumo interno de materiais (CIM) |
| Fluxo de materiais na economia Circular: análise do sistema material |
| Comércio das matérias-primas secundárias |
| Contribuição da reciclagem para atender às exigências dos materiais: taxa de entrada da reciclagem em fim de vida |
| Gestão dos resíduos de equipamento elétrico e eletrónico (REEE) |
| Autossuficiência da União Europeia para o consumo interno de materiais |
| Contratos públicos ecológicos |
| Produção de resíduos (resíduos municipais, alimentares e todos os resíduos) |
| Taxas de reciclagem de resíduos urbanos, todos resíduos excepto maioria dos resíduos minerais, etc... |
| Taxas de reciclagem de fluxos específicos de resíduos: RCD, REEE, embalagens de plástico, madeira e global |
| Investimento privado, emprego e valor acrescentado bruto (VAB): sector da reciclagem e da reparação e reutilização |
| Número de patentes relacionadas com a reciclagem e matérias-primas secundárias |
| Taxa de utilização de material cíclico |
| Indicador da circularidade de materiais |
| Métricas de circularidade de nível da empresa |
| Oportunidade anual de redução de custos de material |
| Indicadores baseados na análise de ciclo de vida |
| Monitorizar a expensão do material |
| Indicador da pegada ecológica de produtos (PEF) |
| Indicador da pegada ecológica baseado na energia acumulativa extraída do ambiente natural por um produto |
| Indicador de benefício da reciclabilidade e da taxa de recuperação de energia |
| Outros indicadores que estão em desenvolvimento para medir determinadas características, como teor de reciclagem, reciclabilidade ou reparação |
| Outros indicadores que podem ser relevantes, mas focam-se em vários aspetos. |
| Vazamento de ciclo de materiais |
| Indicadores de mineração urbana |
| Indicadores de ciclo de vida de cabaz de produtos |
| Avaliação do governo e aspetos da infraestrutura |

A fundação e a empresa Grant Design desenvolveram um indicador que media a circularidade de um produto ou de um modelo de negócio, designado por indicador de circularidade de materiais (MCI). Este indicador foca-se na recuperação dos fluxos de materiais de produto e do nível de circularidade da empresa e baseia-se em 4 princípios base (Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015):

- Uso de matéria-prima de fontes recicláveis e reutilizáveis
- Reutilização de componentes ou materiais reciclados após uso do produto
- Manter o uso prolongado de produtos (por exemplo reutilização/redistribuição)
- Aumentar o uso intensivo de produtos (por exemplo via serviço ou modelos de performance).

O resultado situa-se entre 0 e 1, e a fórmula do indicador depende do cálculo do índice de fluxo linear, da utilização, do resíduo irrecuperável e das matérias-primas virgens. Além disso, existem dois indicadores complementares, nomeadamente de risco (toxicidade, escassez de matérias-primas, fornecimento de materiais e variação do preço) e de impacto (uso da energia, emissões de CO₂ e água) (Ellen MacArthur Foundation *et al.*, 2015).

A União Europeia definiu dez indicadores para monitorizar a abrangência da economia circular nas etapas do ciclo de vida dos recursos, produtos e serviços. A monitorização abrange quatro etapas e aspetos da economia circular (produção e consumo, gestão de resíduos, matérias-primas e ainda competitividade e inovação) (CE, 2018a). Na Figura 6 identificam-se os dez indicadores para monitorizar o alcance da economia circular. Além disso, outros intervenientes europeus (parlamento europeu, conselho europeu e comité económico e social europeu) identificaram alguns indicadores em falta, nomeadamente, a avaliação dos fluxos de materiais na simbiose industrial e na contabilização do capital natural (CE, 2019e).

- 1 Autossuficiência da UE em matérias-primas** – Percentagem de uma seleção de materiais importantes (incluindo matérias-primas essenciais) utilizados na UE que são produzidos no seu território.
- 2 Contratos públicos ecológicos** – Percentagem dos principais contratos públicos na EU que inclui requisitos ambientais.
- 3 a-c Geração de resíduos** – Geração de resíduos urbanos por habitante, total de resíduos gerados (excluindo os principais resíduos minerais) por unidade de PIB e em relação ao consumo interno de materiais.
- 4 Desperdícios alimentares** – Quantidade de desperdícios alimentares produzidos.
- 5 a-b Taxas globais de reciclagem** – Taxa de reciclagem de resíduos urbanos e da globalidade dos resíduos excetuando os principais resíduos minerais.
- 6 a-f Taxas de reciclagem de fluxos de resíduos específicos** - Taxa de reciclagem de resíduos de embalagens de madeira, de resíduos de equipamentos elétricos e eletrónicos; bio resíduos reciclados por habitante e taxa de valorização de resíduos de construção e demolição.
- 7 a-b Contribuição dos materiais reciclados para satisfazer a procura de matérias-primas** – Percentagem da procura global de materiais suprida por matérias-primas secundárias – para materiais específicos e no conjunto da economia.
- 8 Comércio de matérias-primas recicláveis** – Importações e exportações de determinadas matérias-primas recicláveis.
- 9 a-c Investimento privado, empregos e valor acrescentado bruto** – Investimento privados, número de pessoas empregadas e valor acrescentado bruto nos setores de economia circular.
- 10 Patentes** – Número de patentes relacionadas com a gestão e reciclagem de resíduos.



Figura 6. Dez indicadores de monitorização da economia circular (CE, 2018a).

Alguns autores (Moraga *et al.*, 2019) realizaram uma pesquisa sobre os indicadores da economia circular. As metodologias encontradas mediam à escala micro e foram agrupadas, de acordo com as estratégias de economia circular (função, produto, componente, material, energia incorporada e referência) e com os objetivos de medição (objetivo 0, 1 e 2). Os objetivos 0 e 1 mediam os ciclos tecnológicos com propriedades físicas, no entanto, o objetivo 0 não considerava os aspetos do pensamento do ciclo de vida, contudo, o objetivo

2 avaliava a modelação da causa-efeito dos ciclos tecnológicos com ou sem aspetos do pensamento do ciclo de vida. Na Tabela 8 apresenta-se alguns indicadores que avaliam o estado da economia circular à escala micro.

Tabela 8. Indicadores que medem a economia circular à escala micro. (Moraga *et al.*, 2019).

| Estratégias de economia circular | Objetivo 0 | Objetivo 1 | Objetivo 2 |
|--|----------------------------|--------------------------|---|
| 1. Função (p.ex. repensar, reduzir) | eDIM | TRP | EVR |
| 2. Produto (p.ex. reusar, renovar, reproduzir) | | Longevity MCI | PLCM SCI |
| 3. Componente (p.ex. reusar, reproduzir) | eDIM | TRP | PLCM |
| 4. Material ((p.ex. reciclar e <i>downcycle</i>) | | | |
| 5. Energia incorporada (p.ex. energia recuperada, aterro sem energia recuperada) | CR RIR RR OSR EOL-RR | NTUM Longevity MCI | CIRC LMA SCI GRI Displacement |
| 6. Referencia (p.ex. geração de resíduos e aterro sem recuperação de energia) | | MCI Longevity | SCI |

eDIM – ease of Disassembly metric; *CR* – old scrap Collection Rate; *RR* – Recycling process efficiency Rate; *EOL-RR* – End of Life Recycling Indicator; *Metric*; *RIR* – Recycling Input Rate; *OSR* – Old Scrap Ratio; *MCI* – Material Circularity Indicator; *PLCM*- Product Level Circularity; *CPI* – Circular Economy Performance Indicator; *CEI* – Circular Economy Index; *VRE* – Value-based Resource Efficiency; *EVR* – Eco-cost value ratio; *LMA* – Lifetime of materials on Anthroposphere; *SCI* – Sustainable Circular Index; *GRI* – Global Resource Indicator; *NTUM* – Number of Times of Use a Material.

No estudo efetuado por (Niero e Kalbar, 2019) estes autores utilizaram dois grupos de indicadores que foram ligados através da análise multicritério de apoio à decisão, através da metodologia *TOPPIS* – *Technique for Order by Similiarity to Ideal Solution*. Um grupo de indicadores era baseado na circularidade do material, nomeadamente, o indicador da circularidade do material (MCI) e a pontuação de material reutilizado (MSR). Enquanto, o outro grupo era apoiado na análise de ciclo de vida e analisaram os impactos ambientais das alterações climáticas, da depleção dos recursos abióticos, da acidificação, das partículas suspensas e do consumo de água. A pontuação de material reutilizado (MSR) quantifica o potencial de reciclabilidade de um produto e resulta da soma da reciclagem intrínseca e do teor de reciclagem, mas antes são multiplicados por dois terços e um terço, respetivamente.

No trabalho realizado por (Saidani *et al.*, 2019) sobre os diferentes indicadores da economia circular distribuídos na literatura entre 2002 e 2010, encontraram 55 indicadores, como se pode ver na Tabela 9. Depois, definiram dez categorias para realizar uma taxonomia dos indicadores da economia circular:

- 1º. Nível – (micro, meso e macro)
- 2º. *Loops* – (preservar, reusar e reciclar)
- 3º. Desempenho – (intrínsecos, impactos)

- 4.º Perspetiva - (atual, potencial)
- 5.º Utilizações – (por exemplo melhorias, comunicações e *benchmarking*)
- 6.º Transversalidade – (genérica e sector específico)
- 7.º Unidades – (quantitativa e qualitativa)
- 9.º Formato – (por exemplo fórmulas, Excel e ferramentas baseadas na web)
- 10.º Fontes – (empresas, agências e academias).

Tabela 9. Lista de 55 indicadores da economia circular na literatura (Saidani *et al.*, 2019).

| Acrónimo | Indicadores | Acrónimo | Indicadores |
|-----------------|---|-----------------|--|
| <i>ACT</i> | <i>Assessing Circular Trade-offs</i> | <i>ERCE</i> | <i>Evaluation of Regional Circular Economy</i> |
| <i>BCI</i> | <i>Building Circularity Indicators</i> | <i>EVR</i> | <i>Eco-efficient Value Ratio</i> |
| <i>C2C</i> | <i>Material Reutilization Part</i> | <i>EWMFA</i> | <i>Economy-Wide Material Flow Analysis</i> |
| <i>CA</i> | <i>Circle Assessment</i> | <i>FCIM</i> | <i>Five Category Index Method</i> |
| <i>CAT</i> | <i>Circularity Assessment Tool</i> | <i>HLCAM</i> | <i>Hybrid LCA Model</i> |
| <i>CBT</i> | <i>Circular Benefits Tool</i> | <i>ICCEE</i> | <i>Indicators for Consumption for CE in Europe</i> |
| <i>CC</i> | <i>Circularity Calculator</i> | <i>ICT</i> | <i>Circularity Indicator Project</i> |
| <i>CECAC</i> | <i>Circular Economy Company Assessment Criteria</i> | <i>IECEE</i> | <i>Indicators for Eco-design for CE in Europe</i> |
| <i>CEI</i> | <i>Circular Economy Index</i> | <i>IECF</i> | <i>Indicators of Economic Circularity in France</i> |
| <i>CEII</i> | <i>Circular Economy Indicators for India</i> | <i>IEDCE</i> | <i>Integrative Evaluation on the Development of CE</i> |
| <i>CEIP</i> | <i>Circular Economy Indicator Prototype</i> | <i>IOBS</i> | <i>Input-Output Balance Sheet</i> |
| <i>CEMF</i> | <i>Circular Economy Monitoring Framework</i> | <i>IPCEE</i> | <i>Indicators for Production for CE in Europe</i> |
| <i>CEPI</i> | <i>Circular Economy Performance Indicator</i> | <i>IPCEIS</i> | <i>Industrial Park Circular Economy Indicator System</i> |
| <i>CET</i> | <i>Circular Economy Toolkit</i> | <i>MCI</i> | <i>Material Circularity Indicator</i> |
| <i>CETUS</i> | <i>Circular Economy Toolbox US</i> | <i>MRCCEI</i> | <i>Measuring Regional CE-Eco-Innovation</i> |
| <i>CEV</i> | <i>Circular Economic Value</i> | <i>NCEIS</i> | <i>National Circular Economy Indicator System</i> |
| <i>CI</i> | <i>Circularity Index</i> | <i>PCM</i> | <i>Product-Level Circularity Metric</i> |
| <i>CIPEU</i> | <i>Circular Impacts Project EU</i> | <i>RCEDI</i> | <i>Regional Circular Economy Development Index</i> |
| <i>CIRC</i> | <i>Circularity Material Cycles</i> | <i>RDI</i> | <i>Resource Duration Indicator</i> |
| <i>CLC</i> | <i>Closed Loop Calculator</i> | <i>RES</i> | <i>EU Resource Efficiency Scoreboard</i> |
| <i>CP</i> | <i>Circular Pathfinder</i> | <i>RI</i> | <i>Recycling Indices (RIs) for the CE</i> |
| <i>CPI</i> | <i>Circularity Potential Indicator</i> | <i>RP</i> | <i>Resource Productivity</i> |
| <i>DEA</i> | <i>Super-efficiency Data Envelopment Analysis Mode</i> | <i>RPI</i> | <i>Reuse Potential Indicator</i> |
| <i>ECEDC</i> | <i>Evaluation of CE Development in Cities</i> | <i>RRS</i> | <i>Recycling Rates</i> |
| <i>EISCE</i> | <i>Evaluation Indicator System of Circular Economy</i> | <i>SCI</i> | <i>Sustainable Circular Index</i> |
| <i>EMCEE</i> | <i>Indicators for Material input for CE in Europe</i> | <i>VRE</i> | <i>Value-based Resource Efficiency</i> |
| <i>EoL-RRs</i> | <i>End-of-Life Recycling Rates</i> | <i>ZWI</i> | <i>Zero Waste index</i> |
| <i>Epice</i> | <i>Environmental Protection Indicators (EPICE) in a context of CE</i> | | |

(Saidani *et al.*, 2017) analisaram as vantagens e desvantagens de 3 ferramentas para medir a circularidade de um produto, nomeadamente, *Material Circulator Indicator (MCI)*, *Circular Economy ToolKit (CET)* e *Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)*. As duas últimas ferramentas incluem um questionário de 33 e 15 questões e são agrupadas em 7 e 5 subcategorias, respetivamente. As subcategorias da ferramenta CEIP dividem-se em conceção e reconceção, produção, comercialização, utilização e fim de vida.

A distribuição das questões, no método CET, passa pelas diferentes etapas de ciclo de vida:

- 7 questões relacionadas com o projeto, produção e distribuição;
- 3 questões alistadas à utilização;
- 6 questões catalogadas à manutenção e à reparação do produto;
- 3 questões relacionadas com o uso e redistribuição do produto;
- 10 questões alistadas à com a reconversão e à reprodução;
- 2 questões relacionadas com o produto, como se fosse um serviço.
- 2 questões alistadas à reciclagem do produto no fim de vida.

(Linder *et al.*, 2017) analisaram alguns indicadores usados na avaliação da circularidade de um material, nomeadamente, *Material circularity indicator*, *Eco-efficient Value Ratio*, *Circular Economy Index*, *REPRO* e *Material Reutilization part Cradle-to-Cradle*. Foram avaliadas na dimensão da transparência, fiabilidade, generalidade, princípios de agregação e validade de construção. Além disso, propuseram uma métrica, (*product level circularity (C)*), baseada no quociente entre a recirculação e o valor total do produto económico. O resultado situa-se entre 0 e 1.

A ferramenta ACV não é uma ferramenta dedicada à economia circular, no entanto, ajuda a avaliar os impactos ambientais e sociais de um sistema produtivo, onde o ciclo de vida começa na extração das matérias-primas e termina na etapa fim de vida. Após ser aplicada, os resultados podem fornecer conhecimentos e estratégias para minimizar os impactos sociais e ambientais da solução desenvolvida (WBCSD e Climate-KIC, 2018).

A implementação do conceito de economia circular pode ser medido por indicadores únicos e múltiplos e estes focam-se na medição de fluxos de materiais e energia, uso da terra e consumo, e outros ciclos de vida (Elia *et al.*, 2017). Na Tabela 10 identificam-se os indicadores únicos e múltiplos e os parâmetros a avaliar.

Tabela 10. Indicadores únicos e múltiplos para avaliar a implementação da economia circular (Elia *et al.*, 2017).

| Parâmetro | Indicador único | Indicador múltiplo |
|------------------------|--|---|
| Fluxo de materiais | Pegada hídrica | Análise de fluxos de materiais |
| | Entradas de materiais por unidade de serviço | Análise de fluxos de substâncias |
| | Mochila ecológica | |
| Fluxo de energia | Demanda de energia acumulada | |
| | Energia incorporada | |
| | <i>Emergy analysis (EMA)</i> | |
| | <i>Exergy analysis (EXA)</i> | |
| Uso da terra e consumo | Pegada ecológica | |
| | Índice de processo sustentável | |
| | Índice de área de dissipação | |
| Outros ciclos de vida | Pegada de carbono | Avaliação de ciclo de vida |
| | Potencial de danos no ecossistema | Mapa Estratégico de Desempenho Ambiental |
| | | Indicador de Desempenho Ambiental Sustentável |

Os indicadores (Tabela 10) podem quantificar diretamente ou indiretamente os requisitos identificados na Tabela 11 (redução de entradas e uso de recursos naturais, redução de emissões, redução de perdas no valor de materiais, aumento da partilha de recursos renováveis e reciclados e aumento da durabilidade de produtos. Por exemplo, a metodologia da avaliação de ciclo de vida (ACV) permite quantificar diretamente a redução de entradas e uso de recursos naturais, a redução de emissões e a redução de perdas no valor de materiais, mas calcula indiretamente o aumento da partilha de recursos renováveis e reciclados (Elia *et al.*, 2017).

2.1.4. Transição para um modelo de economia circular

Ao longo dos últimos anos, a visão dos diferentes decisores políticos tem sido modelada de maneira diferente sobre os vários problemas ambientais, nomeadamente, pela perda da biodiversidade, poluição da água, solo e ar, depleção de recursos naturais e uso excessivo da terra. Neste sentido, o conceito da economia circular começa a ser discutido na agenda política para resolver questões relacionadas com a sustentabilidade e aparecem diferentes planos como, por exemplo, a lei chinesa de promoção da economia circular, ou o plano de ação para uma economia circular na União Europeia (EU) (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

O conceito de economia circular foi aplicado de maneira diferente por vários sistemas políticos, sociais e culturais. Na década de 80 e 90, os decisores políticos e os economistas

alemães e japoneses foram influenciados pelo conceito de economia circular e, em 1994, a Alemanha aprovou a legislação baseada nos princípios de economia circular, nomeadamente, a lei da gestão de resíduos através do ciclo fechado de substâncias.

Após a entrada no século XXI, alguns países desenvolveram várias iniciativas em torno da economia circular. A China, em 2002 e em 2008, utilizou o conceito como instrumento de política e definiu uma lei no âmbito da promoção da economia circular. Também em 2008, o G8 define o plano de ação para os 3Rs (reduzir, reutilizar e reciclar) e alguns países (Portugal, Suíça, Dinamarca e Reino Unido) aplicam o conceito de economia circular na gestão de resíduos (EY-AM&A e 3Drivers, 2018; Lemos, 2018; Winans *et al.*, 2017).

A partir de 2010, a fundação da Ellen MacArthur tem divulgado e promovido o conceito de economia circular, de tal modo, que empresas e governos aderiram a este conceito. Também cooperou com a União Europeia no pacote da Economia Circular em 2015 (Lemos, 2018). No fórum económico mundial de Davos em 2014, a fundação Ellen MacArthur e a *McKinsey Economy* apresentaram o relatório denominado “*Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*” (Lemos, 2018). As Nações Unidas, em 2015, lançaram o conjunto de dezassete objetivos de desenvolvimento sustentável, no qual o objetivo 11 (cidades e comunidades sustentáveis) e 12 (produção e consumo sustentáveis) relacionam-se com a economia circular (Lemos, 2018).

Por fim, a Comissão Europeia apresentou uma comunicação “*Roteiro para uma Europa eficiente na utilização de recursos*” e o pacote da economia circular, em 2011 e 2015, respetivamente. Também, em 2014, Agência Europeia do Ambiente apresentou o documento “*Building a resource-efficient and circular economy in Europe*” (Lemos, 2018). Em 2017, foi lançada a norma BSI 8001:2017 – *Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations. Guide*. Esta norma fornece recomendações e orientações que ajudam as empresas a aplicarem o conceito da economia circular. Contudo, a norma não identifica requisitos para avaliar a conformidade da implementação ou indicações para emitir a certificação (Lemos, 2018; Pauliuk, 2018). Na Figura 7 mostra-se alguns acontecimentos importantes na definição da economia circular.

Em 2015, o pacote elaborado pela comissão europeia visa manter o valor dos produtos, materiais, e recursos na economia pelo maior tempo possível e, ao mesmo tempo, minimizar a produção de resíduos, de modo a desenvolver uma economia mais competitiva e sustentável, de baixo carbono e eficiente na gestão de recursos. Adicionalmente, em 2018,

adotou um conjunto de medidas políticas, de modo a aumentar a transição da economia. Assim, a União Europeia alterou a legislação de gestão dos resíduos e lançou um conjunto de medidas relacionadas com os plásticos e matérias-primas críticas (Mayer *et al.*, 2019).

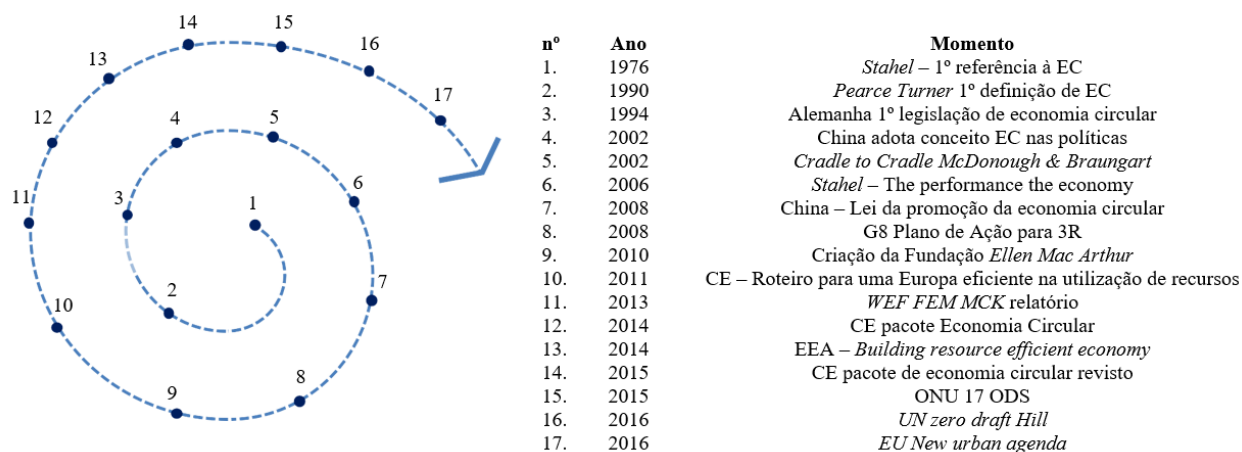


Figura 7. Momentos históricos na definição de economia circular (Lemos, 2018).

Na União Europeia, a transição para a economia circular poderá gerar 600 bilhões de euros anuais, no setor da indústria e manufatura, enquanto a economia mundial poderá faturar 1000 bilhões de dólares, procurando que a aplicação desta abordagem concilie o crescimento económico e o desenvolvimento sustentável (Kalmykova *et al.*, 2018).

A Agência Europeia do Ambiente (AEA) identificou cinco áreas que necessitam de ser consideradas para avaliar a transição: entradas de materiais, eco design, produção, consumo e reciclagem do resíduo. Cada área contém um conjunto de questões e indicadores que podem avaliar a transição (Reichel *et al.*, 2016).

A mudança para uma economia circular necessita da intervenção política através de incentivos económicos e de um quadro regulamentar. Além disso, os diferentes intervenientes precisam de mudar a sua visão, de modo a criar condições favoráveis ao sistema da transição. Os resultados da mudança deveriam refletir em três reduções e em dois benefícios (Elia *et al.*, 2017), como se pode ver na Tabela 11.

Durante a transição para a economia circular, aparecem constrangimentos, fatores potenciadores e possíveis soluções na União Europeia (Tabela 12), bem como, nos países e nas regiões (Tabela 13).

Tabela 11. Reduções e benefícios da mudança de uma economia linear para economia circular (Elia *et al.*, 2017).

| Impacto | Objetivo |
|---|---|
| Redução de entradas e uso de recursos naturais | Reduzir a erosão do ecossistema natural provocado pelo modelo linear, através da criação de valor com poucos recursos. O benefício está na preservação de recursos naturais através do uso eficiente de matérias-primas, água e energia. |
| Redução de emissões | Reduzir emissões diretas e indiretas. |
| Redução de perdas no valor de materiais | Implementação de modelos de ciclos fechados para recuperar e reciclar produtos e materiais. A execução é conseguida com ajuda dos fluxos reversos, de modo a impedir a produção de resíduos, a minimizar inceneração e a deposição em aterro e reduzir as perdas de energia e material. |
| Aumento da partilha de recursos renováveis e reciclados | Reduzir as emissões ao longo do ciclo de matérias, através do uso menor matérias-primas e uso maior de fontes sustentáveis. Outro objetivo passa pela redução da poluição por meios de ciclo de materiais mais limpos. |
| Aumento da durabilidade de produtos | Aumentar a extensão da vida útil dos produtos através da adoção de novos modelos de negócios baseados em serviços orientados para o uso e reutilização de produtos e componentes, e reutilização do material reciclado. |

Tabela 12 Constrangimentos, fatores facilitadores e soluções na UE (Houston *et al.*, 2018).

| Barreiras na União Europeia | Fatores facilitadores na União Europeia |
|--|---|
| Barreiras de taxaço e regulatórias no uso de matérias-primas secundários. | Plano de ação europeu da economia circular. |
| Falta de harmonização entre estados-membros. | Financiamento europeu. |
| Ausência de plano integrado de reciclagem na União Europeia. | Estratégia dos plásticos na União Europeia. |
| Preços. | Medidas reguladoras (diretivas que apoiam a economia circular e o rotulo ecológico da União Europeia). |
| Abordagem fragmentada nas ações da economia circular. | Harmonização e aconselhamento na metodologia da pegada ambiental do produto e método da pegada ambiental em organizações. |
| Cenário político e dos mercados baseados em modelos lineares. | Outras formas de financiamento. |
| Falta de informação sobre os fundos disponíveis na União europeia. | |
| Possíveis soluções na União Europeia | |
| Incentivos financeiros aos modelos circulares (p.ex. taxas maiores para as matérias-primas virgens). | |
| Desenvolvimento de passaportes do material e normas de qualidade para produtos reciclados ou reusados. | |
| Desenvolvimento de indicadores alternativos para medir a riqueza. | |
| Regulamentação para os materiais reciclados. | |
| Coordenação entre iniciativas (p.ex. economia circular, rotulagem e matérias-primas). | |
| Ajuda financeira. | |

Tabela 13. Constrangimentos, fatores facilitadores e possíveis soluções nos países e regiões
(Houston *et al.*, 2018).

| Barreiras nos países e regiões | Fatores facilitadores nos países e regiões |
|---|---|
| Contratos públicos efetuados por critérios financeiros. | Prioridades na economia circular governamental no desenvolvimento de estratégias de especialização inteligente. |
| Fraca legislação na gestão dos resíduos. | Plataformas com vários <i>stakeholders</i> . |
| Falta de metas obrigatórias em torno de metas circulares. | Participação ativa dos cidadãos. |
| Apoio político geralmente fraco. | Planos e metas. |
| Má comunicação e aplicação de políticas. | Envolvimento no desenvolvimento de políticas. |
| Infraestrutura deficiente, economias de escala. | Campanhas de conscientização. |
| Barreiras legais. | Incentivo nas atividades de reutilização e reparação de materiais. |
| Possíveis soluções nos países e regiões | |
| Criação de zonas para demonstradores. | |
| Alargamento dos contratos públicos ecológicos. | |
| Gestão de resíduos. | |
| Preços e ajuda financeira. | |
| Responsabilidade e comunicação. | |

A resolução do conselho de ministros n.º 190-a-2017 define o plano de Ação para a Economia Circular (PAEC), em Portugal. O plano apresenta sete ações macro:

- Ação 1 – Desenhar, reparar, reutilizar: uma responsabilidade alargada do produtor
- Ação 2 - Incentivar um mercado circular
- Ação 3 - Educar para a economia circular
- Ação 4 – Alimentar sem sobrar: Produção sustentável para um consumo sustentável
- Ação 5 – Nova vida aos resíduos
- Ação 6 – Regenerar recursos: água e nutrientes
- Ação 7 – Investigar e inovar para uma economia circular.

Cada ação tem definido os objetivos, setores chave, papéis/ entidades a envolver, orientações, nível de progresso, objetivo do desenvolvimento sustentável (ODS), indicadores complementares e referências. O setor da construção e de pasta e papel envolvem-se nas ações n.º 2, 3,5 e 7. Além disso, o sector da construção tem uma proposta de agenda de transição, onde os objetivos passam pelo: aumento na introdução de matérias-primas secundárias na economia, diminuição na produção de resíduos e na procura de matérias-primas virgens, redução na emissão de gases com efeito de estufa e redução no consumo de água (DRE, 2017; Eco.nomia, 2020).

O plano de ação da economia circular é uma forma de atingir a sustentabilidade do planeta e faz parte do pacto ecológico europeu, lançado pela comissão europeia. Este pacto tem por objetivo implementar a neutralidade carbónica no continente europeu até 2050 (CE, 2020a, 2020b).

2.2. Papel da construção sustentável na economia circular

2.2.1. A construção sustentável

Cada ano que passa, o sector da construção consome cada vez mais energia e recursos naturais provocando uma degradação do ambiente, ou seja, o continente europeu produz 30 a 36 % das emissões de carbono e consome 50 % (em massa), 42 % e 10 a 15% em massa de matérias-primas, de energia e de água, respetivamente. Além disso, gera 25 a 35% de resíduos. (CTCV, 2006; Torgal e Jalali, 2010). Em Portugal, o setor da construção civil consome 73% do total das extrações de matérias-primas e gera 1/3 dos resíduos (Konstantinovas *et al.*, 2019). Ao nível económico, o setor da construção europeu gera 30% de emprego e 25% da produção industrial (Tomaz, 2014).

As atividades de construção (edifícios, infraestruturas e outras) produzem benefícios económicos e sociais na empregabilidade e no Produto Interno Bruto (PIB), no entanto, podem provocar perdas ambientais devido à ocupação e uso do solo, ao consumo de recursos (por exemplo água e energia), à produção de resíduos e efluentes (líquidos e gasosos) (CTCV, 2006; Tomaz, 2014).

O relacionamento entre a construção e a sustentabilidade torna-se evidente, de modo a mitigar os impactos ambientais. Nesse sentido, surge o conceito de construção sustentável.

Em 1994, Charles Kibert definiu o conceito de construção sustentável, como *“a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos”* e, no mesmo ano, estabeleceram-se sete princípios para a construção sustentável (CTCV, 2006; Tomaz, 2014; Torgal e Jalali, 2010):

1. Reduzir o consumo de recursos.
2. Aumentar a reutilização de recursos.
3. Reciclar materiais em fim de vida e utilizar recursos recicláveis.
4. Proteger os sistemas naturais.
5. Eliminar os materiais tóxicos.

6. Fomentar a qualidade em todas as etapas do ciclo de vida.
7. Garantir qualidade.

Na realidade o conceito de construção sustentável integra os princípios de eco-eficiência, mas incorpora as condicionantes económicas, a igualdade social e o legado civilizacional, como se pode ver na Figura 8. Também têm vários pilares associados, nomeadamente, a redução de energia e água, a garantia da sanidade dos edifícios, o crescimento da durabilidade dos edifícios, o planeamento da conservação e da manutenção dos edifícios, a utilização de materiais eco-eficientes, a baixa massa de construção, a diminuição de resíduos na produção, a redução do custo económico e a garantia de condições dignas de higiene e segurança nos trabalhos de construção (Mateus, 2004).

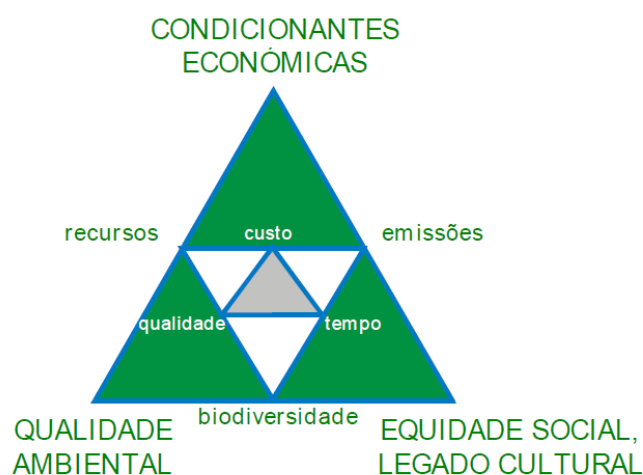


Figura 8. Pontos a considerar na construção sustentável (Mateus, 2004).

De acordo com (Mateus, 2004), os requisitos de materiais eco-eficientes passam pela eliminação de químicos nocivos à camada de ozono, aumento da durabilidade, redução de operações de manutenção, redução da energia primária (desde da extração das matérias-primas até ao processamento), proximidade do local de construção e incorporação de materiais reciclados. A aplicação de práticas sustentáveis na construção promove vantagens sociais, económicas e ambientais, como se pode ver na Tabela 14 (Varela, 2010).

O setor da construção é um setor chave para acelerar na transição económica (linear para circular), por consumir e usar intensivamente grandes quantidades de matérias-primas resultantes da extração. Nesse contexto, o plano de Ação para a Economia Circular (PAEC)

tem uma agenda sectorial de transição para o setor da construção (DRE, 2017; Konstantinovas *et al.*, 2019).

Os objetivos da agenda para o setor da construção relacionam-se com os princípios da construção sustentável, nomeadamente, o princípio da redução do consumo de recursos e o princípio do aumento da reutilização de recursos.

Tabela 14. Vantagens da construção sustentável (Varela, 2010).

| | Económico | Social | Ambiental |
|------------------------------|--|--|--|
| Implantação sustentável | Diminuição de custos para trabalhos preparatórios (estaleiro, limpezas e vias de comunicação. Redução de custos na energia de implantação do edifício. Baixo custo de manutenção dos espaços verdes. | Melhoria na estética do espaço envolvente (edifícios e área envolvente). Variedade de opções de transporte para os trabalhadores. | Manutenção dos solos. Minoração no uso de recursos. Manutenção dos recursos ecológicos. Preservação dos solos e água. Diminuição no uso de energia e poluição do ar. |
| Eficiência no uso da água | Redução de custos iniciais. Redução da despesa da água. Redução na despesa municipal sobre o tratamento das águas residuais. | Manutenção da água para as gerações futuras. Redução nas instalações de tratamento de águas residuais e problemas associados. | Diminuição no uso de água potável e descargas poluentes. Redução na pressão sobre os ecossistemas aquáticos. Manutenção dos recursos aquíferos para a vida selvagem e agricultura. |
| Eficiência no uso da energia | Redução de custos iniciais através de soluções de energia integrada. Diminuição de 70% no consumo e custos de combustíveis e eletricidade. Diminuição do requisito de novas. Infraestruturas e redução de custos energia para os consumidores. | Melhoria do conforto dos ocupantes devido à melhoria das condições térmicas. Diminuição de novos aparelhos de distribuição de energia. Menor necessidade de novas. instalações de distribuição de energia. | Menor consumo de eletricidade e combustíveis fósseis e a respetiva redução da poluição e emissões de dióxido de carbono. Redução dos impactes da produção e distribuição de combustíveis fósseis. |
| Materiais e recursos | Redução de custos iniciais devido à reutilização de materiais e utilização de materiais reciclados. Redução nos custos de tratamento para resíduos. Utilização de materiais duráveis leva à redução de custos. Redução de custos municipais em novos aterros. | Redução na capacidade de aterros e prejuízos associados. Crescimento do mercado para produtos de produção ambiental. Diminuição do tráfego devido à utilização de materiais locais e regionais. | Diminuição na pressão sobre os aterros. Diminuição de matérias virgens. Crescimento das florestas devido a manutenção correta. Crescimento do mercado de materiais reciclados. |
| Qualidade ambiental interior | Produtividade organizacional devido ao melhoramento da performance dos trabalhadores, menor abstencionismo e redução da rotatividade. Menores custos com seguros. devido a baixas de saúde. Diminuição ameaças por litigação. | Diminuição de impactos adversos para a saúde. Melhoria da satisfação. e conforto dos ocupantes. Melhor produtividade a nível individual. | Melhor qualidade do ar interior dos edifícios, incluindo uma redução das emissões voláteis, como o dióxido e o monóxido de carbono. |
| Operação e manutenção | Diminuição dos custos de energia. Diminuição de custos relacionados com queixas. Aumento do tempo de vida dos edifícios e equipamentos. | Produtividade, satisfação, saúde e segurança para os residentes. | Redução no consumo de energia, poluição atmosférica e emissões de dióxido de carbono e outros impactes ambientais da produção e utilização de energia. |

Os diferentes intervenientes da construção civil, nomeadamente, donos de obra, arquitetos e engenheiros, fornecedores e vendedores, empresas de construção, comércio por grosso, investidores imobiliários, clientes, empresas de construção e instalação, proprietários, empresas de desconstrução ou demolição, empresas de gestão de resíduos, instituições financeiras e bancárias, e reguladores e legisladores, terão de adaptar ou mudar o seu papel na cadeia de valor. Por exemplo, os donos de obra devem incentivar a construção de acordo com os sistemas de certificação (BREEM, LEED, GRESB e *Well building*), enquanto os fornecedores e vendedores devem aumentar a transparência sustentável dos materiais, através das avaliações de ciclo de vida (ACV) ou da declaração ambiental do produto (DPA). (Thelen *et al.*, 2018).

Em Portugal, o potencial económico e o potencial de circularidade de vários sectores foram determinados e verificou-se que o setor da construção tem o maior potencial de circularidade, como se pode ver na Figura 9 (EY-AM&A e 3Drivers, 2018).

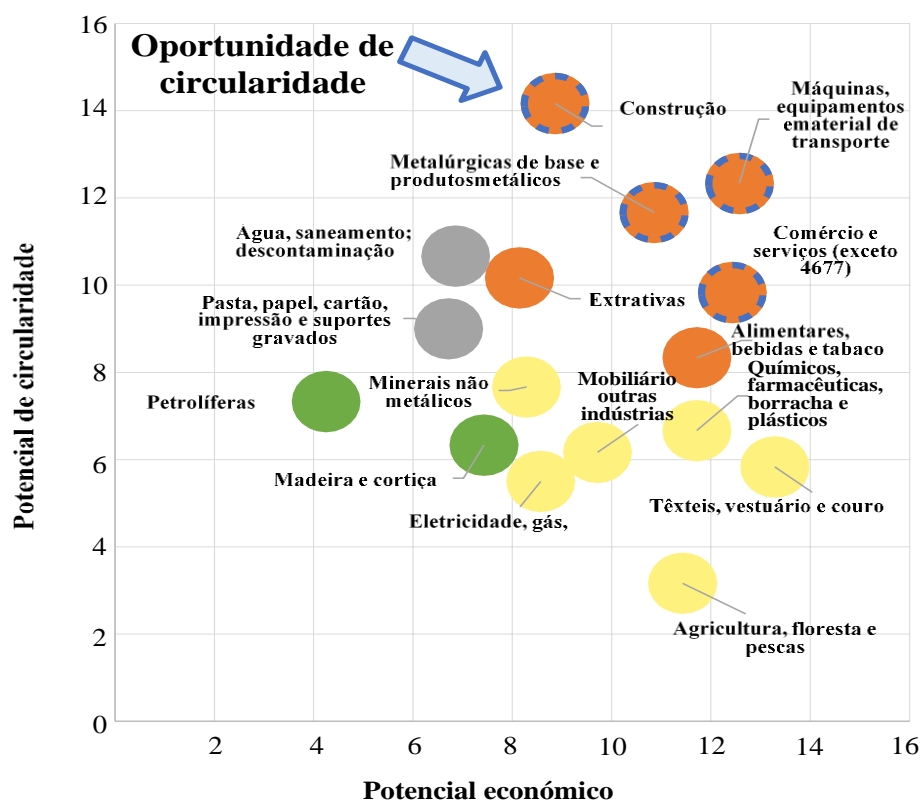


Figura 9. Potencial económico e de circularidade de vários sectores (EY-AM&A e 3Drivers, 2018).

2.2.2. O contributo dos materiais de construção para os 5R's numa economia circular

As áreas das infraestruturas (pontes, portos, etc), infraestruturas de transporte, edifícios residenciais, comerciais, e sociais consomem 15%, 20%, 25%, 20% e 20% dos agregados usados, respetivamente, no sector da construção (Martins, 2019).

A União Europeia definiu a prevenção do resíduo, minimização na quantidade de resíduos produzidos, recuperação do resíduo através da reutilização, reciclagem e produção de energia, melhores condições de tratamento, e regulação nos transportes, como estratégias de redução de resíduos em aterros (Smol *et al.*, 2015).

Os princípios da economia circular incluem os 3R's (reduzir, reutilizar e reciclar) mas é possível através da (re) manufatura industrial aprofundar esta metodologia de forma a conter 6R's (reutilizar, reciclar, redesenhar, remanufaturar, reduzir e recuperar) para se atingir um maior grau de circularidade e de sustentabilidade. Com esta abordagem consegue-se fechar círculos (ou ciclos) mais ou menos longos e estender o ciclo de vida dos produtos. Além disso, cada R tem uma função definida (Jawahir e Bradley, 2016), a saber:

- Reduzir – pretende diminuir o consumo de recursos, energia, emissões e resíduos.
- Reutilizar – Os materiais, após o primeiro ciclo de vida, exigem a utilização em vários ciclos de vida, de modo a reduzir o consumo de matérias-primas virgens para produzir novos produtos.
- Reciclar – converter os resíduos em novos materiais, de modo a emitir uma quantidade mínima de resíduos e emissões e, ao mesmo tempo, consumir uma quantidade mínima de energia e recursos.
- Recuperar – recolher os produtos no fim de vida através da desmontagem, triagem e limpeza e, depois, aplicá-los nos próximos ciclos de vida.
- Redesenhar – desenhar o novo ciclo de vida a partir dos materiais que chegam ao fim de vida
- Remanufatura – reprocessar os produtos já usados para restaurar o estado original, ou semelhante.

A inclusão dos 6 R's numa perspetiva de economia circular necessita da adoção de mecanismos que gerem a criação de valor sustentável. Estes instrumentos passam pela inovação de produtos e processos, educação e estágio, novas metodologias e novas

abordagens. A implementação dos 6R's terá de ser avaliada económica, social e ambientalmente. No caso ambiental, a medição pode ser feita através de ferramentas de análise de ciclo de vida, enquanto no caso económico, pode ser avaliada através da análise de custos no ciclo de vida (Jawahir e Bradley, 2016).

A qualidade e a quantidade dos materiais alternativos aos naturais irão definir o processo de passagem à escala industrial (escalabilidade), assim como, os custos de recolha e de processamento devem ser idênticos à exploração e processamento dos materiais virgens. Além disso, devem ser criadas condições equitativas e legislação de modo a favorecer o uso de matérias-primas alternativas (Thelen *et al.*, 2018).

A viabilidade económica das opções de reciclagem e de reutilização podem ser ajudadas pelos instrumentos económicos e regulatórios fortes como, por exemplo, impostos e proibições nos aterros sanitários. Contudo, os instrumentos anteriores podem não ser suficientes para capitalizar o valor do novo material, nesse caso, uma solução seria a participação do governo com a indústria na avaliação de opções de gestão de resíduo alternativas ou desenvolvimento de normas de qualidade para os novos materiais (Costa *et al.*, 2010)

Nos modelos circulares, os materiais de construção em fim de vida devem ser reutilizados para prolongar o valor do material, mas a desconstrução deve ser feita seletivamente para aumentar o leque de aplicações (Benachio *et al.*, 2020).

As opções adotadas numa construção circular apresentam diferentes graus de circularidade. As opções de circularidade ordenam-se da seguinte maneira em ordem crescente (van Sante, 2017):

- *Downcycle* – Os resíduos obtidos na demolição são reincorporados como recursos em novas formulações.
- *Reciclagem* – Os materiais obtidos na demolição seletiva são reintroduzidos criteriosamente.
- *Reparação* – As soluções de renovação ou transformação após arranjo ou renovação dos materiais permite estender o tempo de vida útil.
- *Redução* – Diminuir o consumo de materiais de construção que incorporem elevadas taxas de matérias-primas virgens ou de energia primária (*embodied energy*).
- *Reutilização e manutenção* – Optar por produtos que tenham maior tempo de vida útil e menores necessidades de manutenção.

O setor da construção produz cerca de 1/3 das emissões globais de gases de efeito de estufa e uma solução para as reduzir está no uso de subprodutos ou resíduos na produção de materiais de construção. Frequentemente o transporte entre produtor e recetor e a produção do novo material podem também condicionar a fabricação do produto, devido à geração de elevados impactos ambientais. Assim, a solução alternativa deve ser suportada por uma avaliação de ciclo de vida que analise de forma credível os impactos ambientais. (Nußholz *et al.*, 2019).

As práticas sustentáveis começam a entrar no setor da construção, através da reutilização de materiais e da reciclagem de materiais, de modo a produzir novos materiais. Esta prática pode reduzir o consumo de matérias-primas virgens e a deposição de resíduos em aterro (Nußholz *et al.*, 2019). Os materiais de construção menos sustentáveis consomem grandes quantidades de recursos naturais e de energia para serem processados, mas apresentam baixos custos de produção devido à elevada maturação dos processos produtivos. Os materiais de construção mais sustentáveis incorporam resíduos como matéria-prima e apresentam menores impactos ambientais, mas o atual modelo económico e a legislação atual apresentam ainda barreiras à sua disseminação (Xu *et al.*, 2020).

As soluções com materiais de construção sustentáveis que vão aparecendo no mercado contribuem para poupar energia e outros recursos gerando também menos emissões. Por exemplo, a produção de cimento “verde” centra-se no uso de grandes quantidades de resíduos como matérias primas e, ao mesmo tempo, reduz as emissões de carbono e o consumo de materiais virgens. Também têm aparecido no mercado, produtos híbridos que incorporam materiais renováveis (biofibras e madeira) junto a materiais não renováveis, de modo a produzir um produto reciclável, durável, estável e impermeável (Xu *et al.*, 2020).

Em Portugal, atualmente existem só quarente e cinco materiais que tem o estatuto de subproduto e podem ser utilizados como matérias-primas por outras indústrias. O sector da energia produz duas substâncias de grande utilização, as cinzas volantes de centrais térmicas de carvão e o gesso de dessulfurização de gases de combustão, que podem ser utilizados pelas indústrias cimenteiras e por materiais de base cimentícia (argamassas e betões), ou na produção de outros materiais de construção (gesso cartonado), respetivamente. Além destes subprodutos, existem outros que podem ser utilizados na produção de materiais de construção como, por exemplo:

- As aparas de espuma de poliuretano da produção de espuma de poliuretano.

- A calamina da produção e transformação do aço.
- A escória da produção de eletricidade.
- Os desperdícios cerâmicos resultantes da produção de produtos cerâmicos.
- As areias de caldeiras a biomassa de leito fluidizado da produção de eletricidade associada a unidades de produção de pasta e papel.

Os subprodutos anteriores podem ser utilizados, respetivamente (APA, 2019a):

- Na produção de aglomerado de espuma e fabrico de painéis de isolamento acústico.
- Na indústria cimenteira, de material refratário, de vidro, de tintas e siderúrgica.
- Na pavimentação rodoviária, produção de clínquer, utilização como agregado leve no fabrico de materiais de construção e utilização como agregado no fabrico de betão.
- No fabrico de pastas cerâmicas para telhas, azulejos, mosaicos, ladrilhos e placas cerâmicas.
- No fabrico de materiais para construção (cimento, betão, argamassas e agregado), terraplanagens e construção de estradas e pavimentação de áreas desportivas.
- No fabrico de materiais para construção (cimento, argamassas).

Ao longo dos últimos anos, realizaram-se diferentes trabalhos de investigação científica que utilizam resíduos como substituto de matérias-primas naturais. As pesquisas realizadas envolveram a construção de demonstradores, de modo a avaliar e aprovar a solução desenvolvida. As soluções aprovadas permitiram criar alternativas às matérias-primas alternativas e algumas das soluções estudadas tem marcação CE como, por exemplo:

- O projeto “Aplicação de resíduos em infraestrutura de transporte e obras geotécnicas – Valorização de escórias de aciaria” demonstrou o desempenho do agregado siderúrgico inerte (ASIC) em camada base, sub-base, leito de pavimento, e aterro (Correia *et al.*, 2017, 2007; Harsco, 2013).
- O projeto “SUPREMA – aplicação sustentável de resíduos de construção e demolição (RCD) em infraestruturas rodoviárias”, que demonstrou a utilização de resíduos da demolição e construção (RCD) em camadas granulares não ligadas de base e sub-base e de leito de pavimento (Roque, 2017a).

- O projeto “AEIRU - Agregados artificiais de escórias de incineração de resíduos urbanos para pavimentos rodoviários” mostrou a utilização em camadas não ligadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários (Freire *et al.*, 2012).

A utilização de resíduos na indústria da construção pode ser uma solução para melhorar a sustentabilidade no sector, no entanto, a implementação dessas soluções requer trabalhos de investigação e desenvolvimento (caracterização do resíduo, estudos laboratoriais e industriais), de enquadramento na legislação em vigor e estudos da viabilidade económica e ambiental.

Capítulo 3

Valorização de resíduos em materiais de construção

3. Valorização de resíduos em materiais de construção

3.1. Uso de resíduos e a legislação associada

A diretiva europeia 2008/98/CE de 19 de novembro de 2008 define resíduos como “*quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer*” (CE, 2008). A gestão de resíduos é definida pela diretiva europeia (EU) 2018/851 de 30 maio de 2018, como “*a recolha, o transporte, a valorização, (incluindo triagem), e a eliminação de resíduos incluindo a supervisão destas operações, a manutenção dos locais de eliminação após encerramento e as medidas tomadas na qualidade de comerciante ou corretor*”(CE, 2018b).

Na última década, a legislação europeia tem sofrido alterações e ao mesmo tempo aparecem novos termos como, por exemplo, a valorização material. Este termo define-se como “*qualquer operação de valorização, que não seja a valorização energética nem o reprocessamento de materiais que serão utilizados como combustíveis ou outros meios de produção de energia. Inclui, entre outras, a preparação para a reutilização, a reciclagem e o enchimento*” (CE, 2018b). O termo geral “valorização” é definido como “*qualquer operação cujo resultado principal seja a transformação dos resíduos de modo a servirem um fim útil, substituindo outros materiais que, caso contrário, teriam sido utilizados para um fim específico, ou a preparação dos resíduos para esse fim, na instalação ou no conjunto da economia* (CE, 2008).

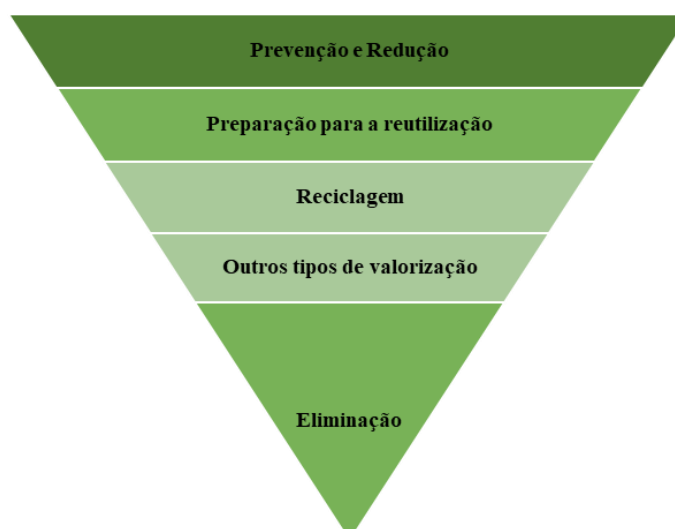


Figura 10. Hierarquização de gestão de resíduos (Ferrão *et al.*, 2011).

A hierarquia dos resíduos assenta em cinco categorias, e as primeiras ações dos diferentes intervenientes é estimular a prevenção e redução dos resíduos. As restantes ações devem privilegiar a preparação para reutilização, reciclagem, ou outro tipos de valorização, por exemplo, a valorização energética e a eliminação (CE, 2008). Na Figura 10 mostram-se as ações prioritárias na gestão de resíduos.

Na prevenção de resíduos, os decisores políticos devem tomar medidas para evitar a produção de resíduos. A diretiva europeia 2018/851 de 30 maio define um conjunto de objetivos para a prevenção de resíduos, ou seja, as medidas que forem tomadas no futuro devem refletir pelo menos um objetivo de prevenção (CE, 2018b). Alguns objetivos enquadram-se nos objetivos do desenvolvimento sustentável e na economia circular. Por exemplo, o objetivo da promoção de modelos de produção e consumo sustentáveis enquadram-se no 12º objetivo de desenvolvimento sustentável (“*garantir padrões e de produção sustentáveis*”), enquanto, o objetivo do desenvolvimento de produtos duradouros, reparáveis, reutilizáveis e atualizáveis integra-se bem no conceito da economia circular.

A diretiva europeia 2018/851 de 30 maio, também, define um conjunto de exemplos de instrumentos económicos e outras medidas para incentivar a aplicação da hierarquia dos resíduos, como é o caso de taxas e restrições aplicáveis à deposição em aterros e à incineração de resíduos que incentivem a prevenção de resíduos e a sua reciclagem, mantendo a deposição em aterros como a opção de gestão de resíduos menos desejável ou, por exemplo, medidas fiscais ou outros meios para promover a aceitação de produtos e materiais que são separados para a reutilização ou reciclados (CE, 2018b).

No espaço nacional estão definidos para já dez fluxos específicos de resíduos, nomeadamente, as embalagens e resíduos de embalagens, as fraldas descartáveis usadas, os óleos alimentares usados, os óleos usados, os pneus usados, os resíduos de construção e demolição, os resíduos de consumíveis informáticos, os resíduos de equipamento elétrico e eletrónico, os resíduos de pilha e acumuladores, os veículos de fim de vida e os plásticos de uso único (APA, 2019b).

Os resíduos têm associado um código de seis algarismos. Além disso, os códigos estão definidos na Lista Europeia de Resíduos (LER) publicada na decisão de 2014/955/EU de 18 de dezembro de 2014. Na LER estão registados 842 códigos de resíduos agrupados em vinte capítulos. Assim, os dois primeiros algarismos designam o capítulo e este representa a área específica da atividade geradora de resíduos. A seguir, os segundos algarismos representam

o subcapítulo, ficando no entanto, o código do subcapítulo representado por quatro algarismos (os dois do capítulo e os dois do subcapítulo). Por fim, os últimos identificam o resíduo específico (Roque, 2017b). Na Tabela 15 apresenta-se os vinte capítulos da lista Europeia dos resíduos (LER).

Tabela 15. Lista de capítulos da Lista Europeia de resíduos (LER).

| Capítulo | Descrição |
|----------|---|
| 01 | Resíduos da prospeção e exploração de minas e pedreiras, bem como de tratamentos físicos e químicos das matérias extraídas. |
| 02 | Resíduos da agricultura, horticultura, aquacultura, silvicultura, caça e pesca, bem como da preparação e do processamento de produtos alimentares. |
| 03 | Resíduos do processamento de madeira e do fabrico de painéis, mobiliário, pasta para papel, papel e cartão. |
| 04 | Resíduos da indústria do couro e produtos de couro e da indústria têxtil. |
| 05 | Resíduos da refinação de petróleo, da purificação de gás natural e do tratamento pirolítico de carvão. |
| 06 | Resíduos de processos químicos inorgânicos. |
| 07 | Resíduos de processos químicos orgânicos 08. |
| 08 | Resíduos do fabrico, formulação, distribuição e utilização (FFDU) de revestimentos (tintas, vernizes e esmaltes vítreos), colas, vedantes e tintas de impressão. |
| 09 | Resíduos da indústria fotográfica. |
| 10 | Resíduos de processos térmicos. |
| 11 | Resíduos de tratamentos químicos de superfície e de revestimentos de metais e de outros materiais; resíduos da hidrometalurgia de metais não ferrosos. |
| 12 | Resíduos da moldagem e do tratamento físico e mecânico de superfície de metais e plásticos. |
| 13 | Óleos usados e resíduos de combustíveis líquidos (exceto óleos alimentares, 05 e 12). |
| 14 | Resíduos de solventes, fluidos de refrigeração e gases propulsores orgânicos (exceto 07 e 08). |
| 15 | Resíduos de embalagens; absorventes, panos de limpeza, materiais filtrantes e vestuário de proteção sem outras especificações. |
| 16 | Resíduos não especificados noutros capítulos da lista. |
| 17 | Resíduos de construção e de demolição (incluindo solos escavados de locais contaminados). |
| 18 | Resíduos da prestação de cuidados de saúde a seres humanos ou animais e/ou de investigação relacionada (exceto resíduos de cozinha e restauração não provenientes diretamente da prestação de cuidados de saúde). |
| 19 | Resíduos de instalações de gestão de resíduos, de estações ex situ de tratamento de águas residuais e da preparação de água para consumo humano e de água para consumo industrial. |
| 20 | Resíduos urbanos e equiparados (resíduos domésticos, do comércio, da indústria e dos serviços), incluindo as frações recolhidas seletivamente. |

Em termos ambientais, qualquer operação de tratamento do resíduo pode ser classificada como uma valorização ou uma eliminação. Na valorização (R) e eliminação (D) existem treze e quinze operações, respetivamente (CE, 2018b, 2008).

A nível europeu, a legislação do resíduo está sob forma de decisões e diretivas. Enquanto, a nível nacional, o resíduo detém um conjunto de regulamentos, desde decretos-lei, decisões e portarias, que definem um conjunto de regras e condições para o seu manuseamento controlado. Na Tabela 16 mostra-se a legislação europeia e portuguesa associada ao resíduo.

Tabela 16. Legislação europeia associada ao resíduo.

| | Legislação | Resumo |
|-------------------|---------------------------|--|
| Europeia | Decisão 2014/955/EU | Indica a lista europeia de resíduos (LER), mas ao mesmo tempo, identifica os resíduos que contém substâncias perigosas. |
| | Diretiva 2008/98/EC | Indica a base de trabalho legal para o tratamento do resíduo da União Europeia. O âmbito passa pela proteção do meio ambiente e saúde pública. Além disso, mostra a importância de técnicas compatíveis de gestão, de recuperação e de reciclagem de resíduos para reduzir a pressão sobre os recursos e melhorar seu uso. |
| | Diretiva 2015/1127 | Altera o anexo II da diretiva 2008/98/CE. |
| | Diretiva (EU) 2018/851 | Altera a diretiva 2008/98/CE. |
| | Diretiva 1999/31/CE | Para o efeito, introduz requisitos técnicos estritos para a deposição de resíduos em aterro. |
| | Decisão n.º 2003/33/CE | Define os critérios e processos aplicáveis à admissão dos resíduos em aterros, de acordo com os princípios estabelecidos na Diretiva 1999/31/CE, nomeadamente no anexo II. |
| Portuguesa | Decreto lei n.º 178/2006 | Estabelece o regime geral aplicável à prevenção, produção e gestão de resíduos, transportando para a ordem jurídica interna a Diretiva n.º 2006/12/CE. |
| | Decreto lei n.º 73/2011 | Procede à terceira alteração ao Decreto-Lei n.º 178/2006 e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE, relativa aos resíduos. |
| | Decreto lei n.º 46/2008 | Define o regime de operações dos resíduos da construção e demolição (RCD). |
| | Decreto lei n.º 183/2009 | Define o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós -encerramentos de aterros. |
| | Decisão 2014/955/EU | Indica a lista europeia de resíduos (LER), mas ao mesmo tempo, identifica os resíduos que contém substâncias perigosas. |
| | Decreto lei n.º 75/2015 | Aprova o regime de licenciamento único ambiental (LUA), de modo a simplificar os processos de licenciamento ambiental e regula o procedimento e emissão do Título Único Ambiental (TUA). |
| | Portaria n.º 145/2017 | Estabelece as regras aplicáveis ao transporte rodoviário, ferroviário, fluvial, marítimo e aéreo de resíduos em território nacional e cria as guias eletrónicas de acompanhamento de resíduos (E-GAR). |
| | Portaria n.º 399/2015 | Identifica os elementos instrutórios necessários para o licenciamento das operações de gestão dos resíduos. |
| | Portaria n.º 137/2017 | Estabelece o modelo do Título Único Ambiental (TUA). |
| | Decreto lei n.º 46/2008 | Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos da demolição e construção (RCD), no entanto foi alterado pelo Decreto de Lei n.º 73/2011. |
| | Decreto lei n.º 102-D2020 | Em 2021, este decreto estabelece o regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos. |

Durante o desenvolvimento e validação de uma proposta de valorização, o resíduo pode entrar num processo de desclassificação de resíduos. Quando o resíduo é desclassificado, o termo resíduo e a legislação associada (Tabela 16) não se aplicam e, ao mesmo tempo, vai permitir a entrada do resíduo no mercado, como uma matéria-prima.

De acordo com a legislação portuguesa, os instrumentos de desclassificação de resíduos envolvem a aplicação do artigo 44.º A do Regime Geral de Gestão de Resíduos e Subprodutos e, ainda, a aplicação do artigo 44.º B do Regime Geral de Gestão de Resíduos (*Fim do Estatuto de Resíduo (FER), preparação para reutilização, reciclagem na indústria transformadora e marcação CE*) (APA, 2017a).

Os mecanismos anteriores podem ser divididos em 3 grupos distintos:

- O primeiro grupo, o resíduo desclassificado advém de uma operação de valorização e é intencionalmente produzido.
- O segundo grupo, o resíduo desclassificado resulta de um processo produtivo que recebe resíduos como matéria-prima e é deliberadamente produzido.
- O terceiro grupo, o resíduo desclassificado deriva de um processo produtivo onde não existe intenção de o produzir e também não existe nenhuma operação de gestão de resíduos que preceda a desclassificação do resíduo.

Então, no primeiro grupo, enquadra-se a preparação para reutilização e a aplicação do Fim do Estatuto do Resíduo (FER). Ao passo que a reciclagem na indústria transformadora e o fabrico dum produto sujeito às marcações CE inserem-se no segundo grupo e, no último grupo, está a aplicação dos subprodutos (APA, 2017b).

Em Portugal, atualmente existem quarenta e cinco materiais que tem o estatuto de subproduto e podem ser utilizados como matérias-primas por outras indústrias. Por outro lado, alguns materiais tem o fim de estatuto do resíduo (FER) comunitário, nomeadamente, as sucatas de ferro, aço e alumínio, o casco de vidro e a sucata de cobre. O fim de estatuto do resíduo (FER) nacional existe para o plástico recuperado e para material de borracha de pneus usados. Os critérios de cada material estão publicados, respetivamente, no regulamento (EU) n.º 333/2011, no regulamento (EU) n.º1179/2012, no regulamento (EU) n.º 715/2013, na portaria n.º 245/2017 e na portaria n.º 20/2018 (APA, 2019c).

A legislação da gestão dos resíduos permite usar o resíduo como subproduto (por exemplo, a indústria do cimento recebe cinzas provenientes das centrais de energia), no entanto, os esforços são pontuais, descoordenados e promovidos pelas grandes indústrias. De uma forma geral, a valorização dos resíduos está condicionada pela burocracia, de modo a conseguirem obter as necessárias autorizações legais (Costa *et al.*, 2010).

A valorização de resíduos como matéria-prima para outras indústrias ou novos campos de aplicação permitiram reduzir a quantidade de resíduos enviados para locais de deposição (aterro) e, conseqüentemente, as instalações existentes terão o seu tempo de vida aumentado. Assim, a necessidade de construção de novas instalações de armazenamento ficaram adiadas ou mesmo eliminadas no tempo, porém, poderá ainda existir a necessidade de construção de estruturas de menor dimensão (Correia *et al.*, 2017).

Os produtos que contenham resíduos na composição ou resíduos que tenham viabilidade para serem utilizados como agregados terão de ser inertes. Deste modo, será necessário avaliar a composição química dos lixiviados. Esta deverá ser classificada como “inerte”, de acordo com os limites impostos no decreto lei n.º 183/2009 de 10 de agosto, como se pode ver na Tabela 17 (Freire *et al.*, 2013; Roque *et al.*, 2010).

Tabela 17. Valores limites para resíduo inerte, de acordo com o DL n.º 183/2009 (DRE, 2009).

| Componente | Resíduo inerte | Unidade | Componente | Resíduo inerte | Unidade |
|-----------------|----------------|--------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| Arsénio, As | 0,5 | mg/Kg de matéria seca | Antimónio, Sb | 0,06 | mg/Kg de matéria seca |
| Bário, Ba | 20 | | Selénio, Se | 0,1 | |
| Cadmio, Cd | 0,04 | | Zinco, Zn | 4 | |
| Cromo total, Cr | 0,5 | | Cloreto, C | 800 | |
| Cobre, Cu | 2 | | Fluoreto | 10 | |
| Mercúrio, Hg | 0,01 | | Sulfato | 1000 | |
| Molibdénio, Mo | 0,5 | | Índice de fenol | 1 | |
| Níquel, Nq | 0,4 | | COD | 500 | |
| Chumbo, Pb | 0,5 | | SDT | 4000 | |

Depois da viabilidade técnica ser dada como positiva, é necessário avaliar os impactos ambientais dos novos produtos através de processos de avaliação de ciclo de vida (ACV) (Lemos, 2018). Este instrumento de avaliação pode ser útil (Almeida, 2018):

- Na identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental dos produtos em várias fases do seu ciclo de vida;
- Na informação aos vários decisores da indústria e das diferentes instituições governativas (por exemplo, no planeamento estratégico, definição de prioridades, design ou redesign de produtos ou processos);
- Na seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental, incluídas técnicas de medição;
- E, na comunicação e marketing, por exemplo, na implementação de esquemas de rotulagem ecológica, elaboração de uma alegação ambiental ou produção de declaração ambiental de produto.

De acordo com a lista europeia dos resíduos (LER), os resíduos da indústria de pasta e papel enquadram-se no código LER 03 - *resíduos do processamento de madeira e do fabrico de painéis, mobiliário, pasta para papel, papel e cartão* e, no subcapítulo 03 03 - *resíduos da produção e da transformação de pasta para papel, papel e cartão*. Este subcapítulo contém nove resíduos, além disso, a indústria de pasta e papel produz ainda mais dois resíduos provenientes das caldeiras de biomassa, como se pode ver na Tabela 18. (Barreiros, 2014; CE, 2014a).

Tabela 18. Resíduos da indústria de pasta e papel, de acordo com a LER (CE, 2014a).

| Código | Descrição |
|----------|--|
| 03 03 01 | Resíduos do descasque de madeira e resíduos de madeira. |
| 03 03 02 | Lamas da lixívia verde (provenientes da valorização da lixívia de cozimento). |
| 03 03 05 | Lamas de destintagem, provenientes da reciclagem de papel. |
| 03 03 07 | Rejeitados separados mecanicamente, do fabrico de pasta a partir de papel e cartão usados. |
| 03 03 08 | Resíduos da triagem de papel e cartão destinados a reciclagem. |
| 03 03 09 | Resíduos de lamas de cal. |
| 03 03 10 | Rejeitados de fibras e lamas de fibras, fillers e revestimentos, provenientes de separação mecânica |
| 03 03 11 | Lamas do tratamento local de efluentes, não abrangidas em 03 03 10 |
| 03 03 99 | Resíduos sem outras especificações. |
| 10 01 01 | Cinzas, Escórias, e poeiras de caldeiras (excluindo as poeiras de caldeiras abrangidas em 10 01 04). |
| 10 01 24 | Areias de leitos fluidizados. |

O setor da indústria de pasta e papel produz vários tipos de resíduos e no subcapítulo 0303 do LER estão aproximadamente 88% dos resíduos produzidos por esse setor (Frías *et al.*, 2015).

Os resíduos produzidos pelo sector resultam do processo mecânico, termomecânico, semiquímico e químico (com soda, sulfito, kraft ou sulfato, etc). Atualmente, o processo predominante é o processo de pasta kraft branqueada (FAO, 2018; Pinto, 2005). Na Figura 11 mostra-se o diagrama do processo típico de uma fábrica de pasta Kraft de papel.

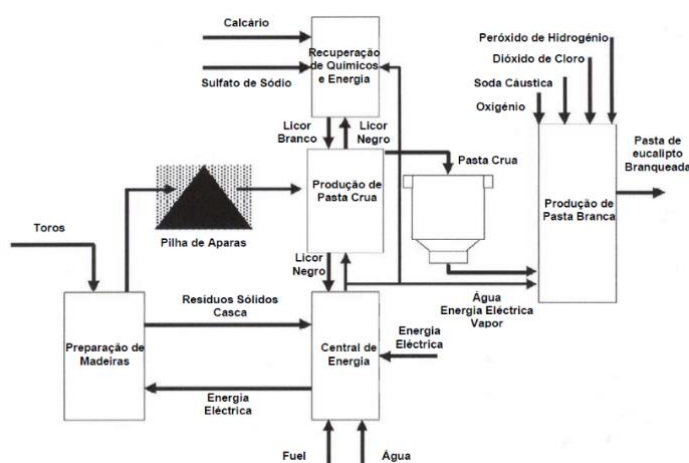


Figura 11. Esquema de uma fábrica de pasta Kraft de papel (Pinto, 2005).

Todos os anos, a indústria de pasta e papel consome enormes quantidade de recursos, nomeadamente, água e madeira e, ao mesmo tempo, gera grandes quantidades de resíduos sólidos e água residuais que carecem de tratamento (Gopal *et al.*, 2019; Mandeep *et al.*, 2020) A CELPA (Associação da Indústria Papeleira) publica anualmente um boletim estatístico que mostra a produção e o destino dos resíduos sólidos produzidos e provenientes da indústria de pasta e papel. Deste modo, a produção de resíduos é agrupada em resíduos da madeira e descasque da madeira, triagem e produção de pasta a partir de papel recuperado, lamas, cinzas, escórias e poeiras e outros resíduos de caldeiras e outros resíduos sólidos, como se pode ver na Figura 12. Na Figura 13 apresenta-se o destino dos resíduos sólidos produzidos (aterro, valorização energética, agricultura e compostagem, valorização em outras indústrias e outros destinos (CELPA, 2017).

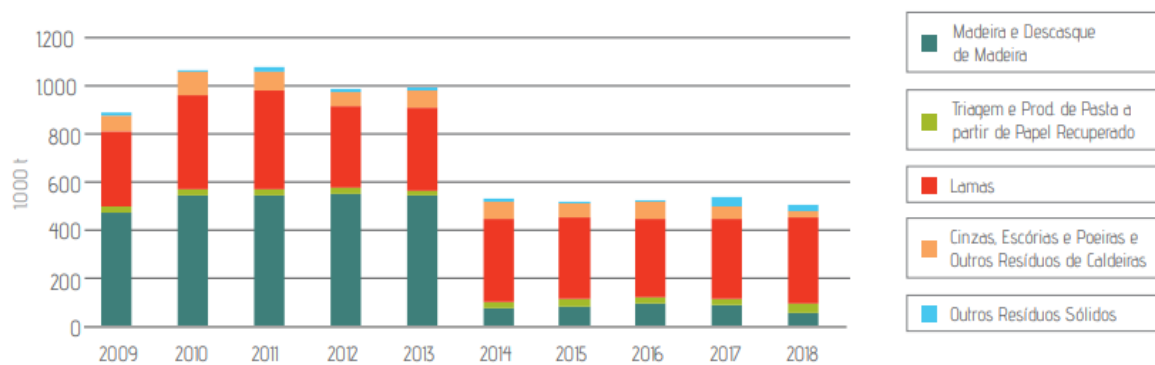


Figura 12. Produção de resíduos sólidos (CELPA, 2018).

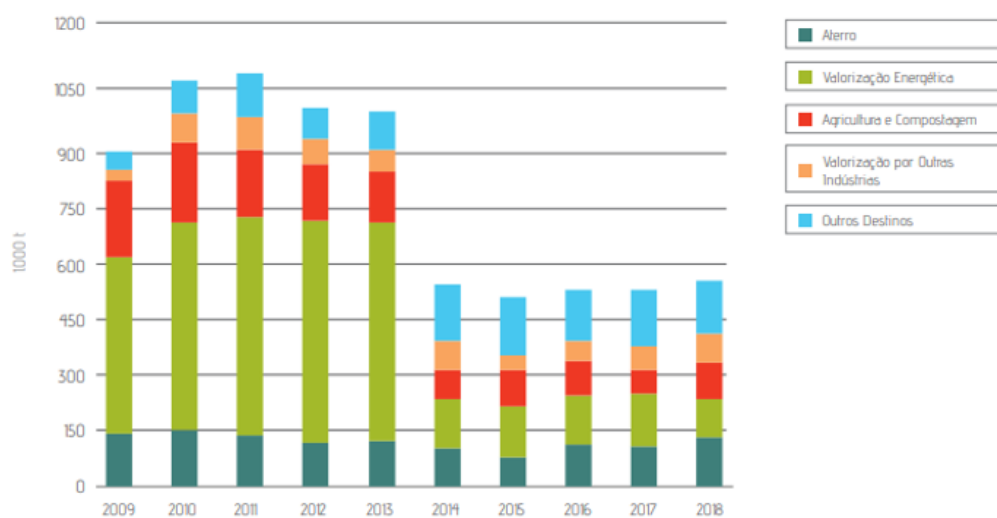


Figura 13. Destino dos resíduos sólidos produzidos (CELPA, 2018).

O sector produz grandes quantidades de resíduos que se traduz numa produção de 100 toneladas de resíduos para 550 toneladas de produção de pasta. Este valor depende da tecnologia utilizada pelas indústrias. Anualmente, a indústria europeia gera cerca de onze milhões de toneladas de resíduos. Os resíduos gerados podem ser classificados como de origem inorgânica ou orgânica (Mandeep *et al.*, 2020; Modolo, 2014; Monte *et al.*, 2009).

Os principais resíduos sólidos produzidos durante a produção de pasta e papel são lenhosos (casca de madeira e serragem), lamas primárias e secundárias resultantes do tratamento de efluentes, as lamas de cal, *lime slaker grits* e *dregs* provenientes da lavagem do licor verde, e cinzas de fundo, cinzas volantes e areias oriundas da combustão de componentes orgânicos de unidades de cogeração (Modolo, 2014; Monte *et al.*, 2009; Vashistha *et al.*, 2019). Na Figura 14 apresenta-se os tipos de resíduos provenientes do processo Kraft e respetivas fases.

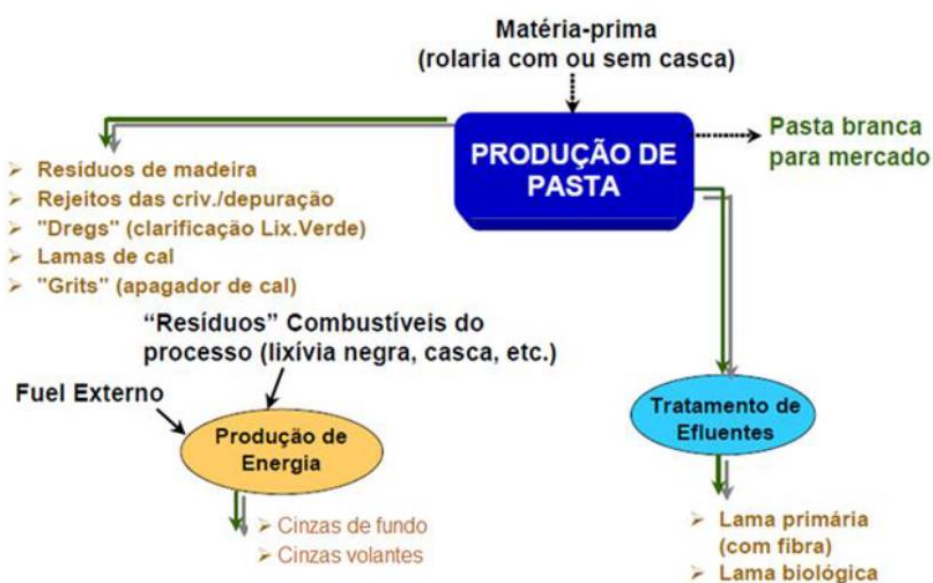


Figura 14. Tipos de resíduos provenientes do processo Kraft e respetivas fases (Pinho, 2014).

Os resíduos orgânicos são as lamas primárias e as lamas secundárias (biológicas), enquanto, os restantes resíduos classificam-se como inorgânicos (Bastos, 2014; Pinho, 2014). Na Tabela 19 mostra-se os resíduos da indústria de pasta e papel e código LER associado e, como se pode observar, a indústria de pasta e papel não produz resíduos perigosos, no entanto, gera elevadas quantidades de resíduos sólidos, entre os quais se destacam os rejeitos de madeira e da crivagem, as lamas de tratamento primário e secundário

de efluentes, conhecidas como lamas primárias e lamas secundárias, os *dregs* e *grits*, as cinzas volantes e as cinzas de fundo das caldeiras de biomassa e, ainda, as lamas ou cinzas de cal). Este setor tem vindo a fazer o esforço de separar os resíduos por tipos para serem tratados, reciclados e reutilizados, de modo a reduzir a deposição em aterro (CELPA, 2018).

Tabela 19. Designação dos resíduos da indústria de pasta e papel e o seu código LER (Celbi, 2018; Marques, 2015).

| Resíduo | LER |
|--|------------|
| Rejeitos de madeira | 03 03 01 |
| Rejeitos da crivagem/depuração | 03 03 10 |
| <i>Dregs</i> (resíduos do licor verde) | 03 03 02 |
| <i>Grits</i> (resíduos do apagador) | 03 03 02 |
| Lamas de cal | 03 03 09 |
| Lama primária | 03 03 10 |
| Lama biológica | 03 03 10 |
| Cinzas de fundo | 10 01 24 |
| Cinzas volantes | 10 01 01 |

Uma estratégia de valorização dos resíduos passará pela incorporação nos sectores que sejam grandes consumidores de matérias-primas como, por exemplo, o sector da construção associado a vários produtos provenientes da indústria cimentícia, cerâmica e das misturas betuminosas (Mandeep *et al.*, 2020; Marques, 2015). A utilização de resíduos na indústria da construção poderá resolver os problemas ambientais associados aos resíduos, mas, também, fornecerá uma nova matéria-prima para o setor da construção permitindo a este poupar recursos naturais (Ahmadi e Al-Khaja, 2001).

3.2. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários

Atualmente, existem vários estudos que utilizam diferentes resíduos resultantes do processo produtivo de pasta e papel na produção de misturas betuminosas. Na Tabela 20 identificam-se os autores, os resíduos utilizados, a matéria prima substituída e a área de aplicação de alguns desses estudos. No trabalho desenvolvido por (Modolo *et al.*, 2010), estudaram a incorporação dos *dregs* e *grits* numa mistura betuminosa densa e avaliaram o teor ótimo de betume, a porosidade, a estabilidade, a deformação e a sensibilidade à água. Os *dregs*, numa primeira fase, foram caracterizados química e fisicamente tendo produzido três misturas betuminosas com *dregs* (0, 5 e 10%) e um teor de betume de 5,4%. Numa segunda fase determinaram o teor ótimo da mistura para teores de 0, 1, 2, 3 e 4 % de *dregs*. De seguida, como a resistência conservada e o desempenho não foi o desejado, de acordo

com as especificações em vigor, realizaram uma terceira fase, onde os *dregs* foram submetidos previamente a um processo de lavagem e os resultados da resistência conservada foram então compatíveis com as especificações em vigor.

Tabela 20. Identificação das soluções de valorização em pavimentos rodoviários.

| Investigação desenvolvida por | Resíduos utilizados | Matéria prima tradicional (*) | Área |
|--|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| (Modolo <i>et al.</i> , 2010), | <i>Dregs</i> | Agregado (Filler) | Misturas betuminosas |
| | <i>Grits</i> | Agregado fino | |
| (Pasandín <i>et al.</i> , 2016) | <i>Dregs</i> e cinzas volantes | Agregado (Filler) | |
| (Movilla-Quesada <i>et al.</i> , 2018) | Cinzas volantes | Agregado (Filler) | |
| (Dias, 2012) | Areias do leito fluidizado | Agregado fino | |
| | Lamas de carbonato de cálcio | Agregado (Filler) | |

(*) Matéria prima tradicional substituída ou utilizada nos diferentes trabalhos de investigação.

(Modolo *et al.*, 2010), desenvolveram formulações onde *grits* foram introduzidos, por substituição do pó de calcário, em três misturas betuminosas (0, 5 e 10%) e um teor de betume de 5,4%. De seguida, avaliaram a resistência conservada e o desempenho foi adequado às especificações da mistura betuminosa tradicional. Assim, esta investigação demonstrou a viabilidade técnica para se incorporar estes resíduos em misturas betuminosas, no entanto, os *dregs* não podem ser incorporados diretamente sem o referido pré-tratamento de lavagem.

Na investigação desenvolvida por (Pasandín *et al.*, 2016), foi avaliada a utilização de *dregs* como filler numa mistura betuminosa quente de tipo AC 22 base B50/70 G. O resíduo foi caracterizado em termos de várias propriedades como, por exemplo, o teor de água, a distribuição de tamanho de partículas, a morfologia, a composição química e mineralógica, a qualidade dos finos (azul de metileno) e o grau de endurecimento do filler numa matriz (mástique) através do teste anel e bola, da temperatura de amolecimento e do grau de penetração do betume. Além disso, verificaram a sensibilidade à água e as propriedades mecânicas da mistura betuminosa bem como a afinidade entre agregado e betume. Os resultados demonstraram uma baixa resistência à sensibilidade à água, mas com resultados adequados à fadiga e à deformação permanente. Além disso, o resíduo contém minerais solúveis, nomeadamente, thernardite e cesanite. Por fim, apresentava alta viscosidade na mástique e, conseqüentemente, uma baixa trabalhabilidade.

No trabalho desenvolvido por (Movilla-Quesada *et al.*, 2018), foi estudada a utilização de cinzas volantes como filler nas misturas betuminosas. A investigação centrou-se na influência da temperatura nas propriedades funcionais e mecânicas de uma mistura semi-densa. Ao longo da investigação, produziram-se duas misturas de referência do tipo “IV-A-12” e cinco misturas betuminosas com diferentes razões entre a concentração volumétrica de filler (Cv) e a concentração crítica de cinzas volantes (Cs) (0,5; 0,75; 1,0; 1,3 e 1,5%). Todas as misturas possuíam um teor de ligante igual 5%. Depois determinaram algumas propriedades, nomeadamente a densidade, a porosidade e a perda de massa devido à suscetibilidade térmica, através do teste do Cântabro. Neste ensaio, as amostras foram acondicionadas a diferentes temperaturas (-30; -10; 10; 25; 40; 60 e 80°C) e testadas durante 8 a 9 minutos (a 30-33rpm). Em suma, os resultados das misturas com resíduos foram idênticos à mistura tradicional, até 0,75% de cinzas volantes incorporadas.

As lamas de cal e as cinzas de fundo, designadas também por areias de leito fluidizado foram testadas em misturas betuminosas. (Dias, 2012) testou e avaliou, em laboratório, os dois resíduos como agregados alternativos. A mistura de referência enquadrou-se num macadame betuminoso (Fuso A) constituído por 4% de betume (50/70) e por 27, 25, 43 e 5% de brita 2, brita 1, pó de pedra de calcário e filler, respetivamente. Enquanto as misturas betuminosas com resíduo continham diferentes teores de areia de leito fluidizado (5, 10 e 20%) e de lamas de cal (1, 3 e 5%) a substituírem o pó de calcário e o filler, separadamente. Em suma, os resultados da densidade, estabilidade, deformação, porosidade e grau de saturação em betume das misturas, viabilizaram a incorporação das areias de leito fluidizado e das lamas de carbonato de cálcio até 10% e 3%, respetivamente, sem prejudicar a aplicação da mistura betuminosa.

3.3. Valorização de resíduos em materiais cimentícios

Atualmente, existem vários estudos que utilizam os diferentes resíduos resultantes do processo produtivo de pasta e papel na produção de materiais diversos como alguns geopolímeros, argamassas, betões e clínquer. Na

Tabela 21 identificam-se os autores, os resíduos utilizados, a matéria prima substituída e a área de aplicação.

Tabela 21. Identificação das soluções de valorização em materiais cimentícios.

| Investigação desenvolvida por | Resíduos utilizados | Matéria prima tradicional (*) | Área |
|--|--|--|--------------------------------------|
| (Martínez-Lage <i>et al.</i> , 2016) | Cinzas volantes <i>Dregs</i> | Cimento | Argamassa e betão |
| (Zanella e Trannin, 2015) | <i>Dregs - grits</i> | Areia fina | |
| (Zanella, 2014) | <i>Dregs - grits</i> | Areia fina | |
| (Luis de Oliveira Júnior <i>et al.</i> , 2019) | <i>Grits</i> | Areia | Argamassas |
| (Rajamma <i>et al.</i> , 2009) | Cinzas volantes | Cimento | |
| (R. C. E. Modolo <i>et al.</i> , 2014) | Lamas de Cal | Cimento | |
| (Modolo <i>et al.</i> , 2013) | | | |
| (Modolo <i>et al.</i> , 2015) | Cinzas de fundo | Areia | Argamassa (adesiva) |
| (de Azevedo <i>et al.</i> , 2018) | Lamas primárias | Cal | Argamassa de cal |
| (Buruberri <i>et al.</i> , 2015) | Cinza volantes | Clínquer/cimento | Cimento e argamassas |
| (Castro <i>et al.</i> , 2009) | <i>Dregs</i> <i>Grits</i> | | |
| (Simão <i>et al.</i> , 2017) | Lama de cal Cinzas volantes Lama do tratamento do efluente | Clínquer | Cimento |
| (Ahmadi e Al-Khaja, 2001) | Lama do tratamento do efluente | Areia | Betão |
| (Barbosa <i>et al.</i> , 2013) | Cinzas volantes Cinzas de fundo | Cimento Areia | |
| (Madrid <i>et al.</i> , 2018) | Lama de cal Serradura | Cimento Agregado fino | Bloco de betão |
| (Hauser <i>et al.</i> , 1999) | Cinzas volantes | Cal e sulfato | Betão celular autoclavado |
| (Novais <i>et al.</i> , 2018) | <i>Dregs</i> Cinzas volantes | Filler Aluminossilicatos (fonte) | |
| (Novais <i>et al.</i> , 2019) | <i>Dregs</i> Cinzas volantes | Filler Aluminossilicatos (fonte) | Argamassas geopoliméricas |
| (Saeli <i>et al.</i> , 2019b) | Cinzas volantes <i>Grits</i> | Aluminossilicatos (fonte) Agregado | |
| (Saeli <i>et al.</i> , 2019a) | Cinzas volantes - | Aluminossilicatos (fonte) Areia siliciosa natural | |
| (Saeli <i>et al.</i> , 2019c) | Cinzas volantes Efluente alcalino | Aluminossilicatos (fonte) Água destilada | Ligantes e argamassas geopoliméricas |
| Saeli <i>et al.</i> , 2018 | Cinzas volantes <i>Grits</i> | Aluminossilicatos (fonte) Agregado | Betão geopolimérico |
| (Saeli <i>et al.</i> , 2017) | Cinzas volantes Serradura | Metacaulino Agregado fino | Ligante geopolimérico |

(*) Matéria-prima tradicional substituída ou utilizada nos diferentes trabalhos de investigação.

Na trabalho desenvolvido por (Martínez-Lage *et al.*, 2016), estes avaliaram o desempenho da argamassa e do betão com *dregs* incorporados. No betão e na argamassa, a substituição ocorreu no cimento até 20 e 30%, respetivamente. Antes da produção, foi efetuada ao resíduo a caracterização química, mineralógica e física (densidade, superfície específica, tempo de presa e expansibilidade). As argamassas foram avaliadas em termos da resistência à flexão e à compressão, enquanto nos betões se avaliou o espalhamento, a resistência à compressão e à tração, bem como o modulo de elasticidade e a profundidade de penetração da água sob pressão. Os resultados indicaram que os *dregs* são de origem calcária, no entanto não cumpriam os requisitos das propriedades químicas das cinzas volantes para betão (EN 450). Além disso, o uso do resíduo no betão não era adequado, devido à perda de resistência mecânica.

Na investigação desenvolvida por (Zanella e Trannin, 2015), estes autores analisaram o potencial de utilização de *dregs* e *grits* numa argamassa. O resíduo foi caracterizado química e fisicamente (densidade, absorção de água e distribuição de partícula). A substituição ocorreu na areia fina até 40% e, depois, avaliaram a resistência à compressão (28 dias). Após análise de resultados, aplicaram as argamassas com 0, 10, 20 e 30% de resíduos, numa parede e avaliaram a resistência à tração da aderência. A substituição de *dregs* e *grits* por areia fina até 20% não interferiu as propriedades de tração da argamassa.

(Zanella, 2014) avaliaram a durabilidade da argamassa com *dregs+grits* (0, 10 e 20%). A monitorização foi realizada em condições normais e artificiais, através de vários testes, como por exemplo, a radiação ultravioleta, o nevoeiro salino, a degradação térmica e o termogravimétrica. Os resultados das misturas com resíduos (degradação térmica, radiação ultravioleta e termogravimétrica) foram similares à composição padrão. No entanto, nos ambientes marítimos, os resultados das argamassas com resíduo foram inferiores à argamassa padrão.

(Luis de Oliveira Júnior *et al.*, 2019) avaliaram os efeitos da introdução parcial de *grits* numa argamassa mista de cimento e cal. A argamassa de referência era formada por areia quartzítica (0/4,8mm), cimento Portland tipo II e cal hidratada, com um traço 1:2:9 de cimento, cal, areia. Nas formulações com resíduos, os traços das argamassas com 10, 15 e 20% de *grits* eram de 1:2:8,1:0,9, 1:2:7,65:1,35 e 1;2:7,2:1,8 (cimento: cal: areia: *grits*), respetivamente. Além disso, a razão água cimento era de 1:3. Durante a produção, avaliaram a trabalhabilidade das argamassas e, após a produção, determinaram a resistência à

compressão e à flexão (a 3, 7 e 28 dias), bem como, a tensão de aderência. Em suma, verificaram que os *grits* tinham viabilidade de incorporação nestas argamassas de reboco até teores de 15%.

(Rajamma *et al.*, 2009) estudaram a incorporação de cinzas volantes provenientes da queima da biomassa da indústria de pasta e papel. O traço da argamassa de referência e a razão água/cimento era igual 1:3 e 0,55, respectivamente. O cimento das argamassas com resíduo foi substituído parcialmente por 10, 20 e 30% de cinzas volantes de modo a ter pelo menos 120 mm de espalhamento. Verificaram que a composição química das cinzas volantes se enquadrava na classe C das cinzas volantes e as argamassas podiam incorporar até 20% de cinzas volantes sem interferir negativamente na resistência da argamassa.

As lamas de cal foram também avaliadas na produção de argamassas por (R. C. E. Modolo *et al.*, 2014) que estudaram a valorização deste resíduo na produção de argamassas de cimento. Após a caracterização do resíduo, produziram quatro argamassas com diferentes percentagens de incorporação de lama de cal (0, 10, 20 e 30% pelo peso do cimento). No estado fresco, determinaram o tempo de presa, a cinética de hidratação, a consistência da argamassa, e os parâmetros reológicos como, por exemplo, a viscosidade plástica e a tensão de cedência. No estado endurecido avaliaram as fases cristalinas pela difração de raios X, a densidade aparente, a absorção à água, a capilaridade, a resistência à compressão e à flexão aos 7, 28 e 90 dias de cura. Os resultados das propriedades reométricas fixaram um teor máximo de lama de cal (30%) nas argamassas. Verificaram que era imperiosa a eliminação da humidade no caso de ser usado como filler em argamassas preparadas a seco.

Estes autores testaram também o resíduo resultante da combustão da biomassa nas caldeiras de leito fluidizado (cinzas de fundo) nas argamassas de revestimento em duas condições diferentes. Numa primeira, as cinzas de fundo foram peneiradas entre a fração 0,125 e 1mm, para serem idênticas à areia utilizada na produção das argamassas. Enquanto que, na segunda condição, as cinzas de fundo foram lavadas e peneiradas para diminuir o teor de sais solúveis (cloretos). A argamassa de referência era composta por cimento Portland do tipo 1, 42,5R, duas areias (S1 e S2), filler calcário e água. A substituição, nas argamassas com resíduo, aconteceu na areia S2 por 10 e 20% de cinzas de fundo obtidas nas condições descritas. Depois, avaliaram as propriedades no estado fresco, nomeadamente a densidade, o tempo de presa, a consistência, o teor de ar e a retenção de água. Após o tempo de cura, determinaram a resistência à compressão após 1, 7 e 28 dias de cura, o modulo de

elasticidade após 28 dias, e a variação dimensional após 7 e 28 dias de cura. De um modo geral, os resultados das argamassas com resíduos não provocaram impacto negativo nas propriedades relevantes das argamassas e os resultados estavam de acordo com os requisitos das especificações (Modolo *et al.*, 2013).

As cinzas de fundo, também, foram estudadas na produção de argamassas adesivas. Na fase inicial, compararam a distribuição de partícula entre as cinzas de fundo provenientes de diferentes centrais de biomassa e analisaram a produção anual de cinzas produzidas. Depois, realizaram um pré-tratamento nas cinzas de fundo (peneiração entre a fração 0,25 e 1 mm). Após a caracterização das cinzas de fundo, produziram quatro formulações (com 0, 25, 50 e 100% de resíduo). A formulação padrão era formada por água, areia (S1 e S2), cimento (CEM I 42,5 e CEM II/ A-L, 42,5) e pó polimérico (combinação de acetato de vinil e de etileno). Avaliaram as propriedades no estado fresco, e no estado endurecido, onde determinaram a resistência adesiva da argamassa em três condições diferentes: após um tempo de cura (7, 14 e 28 dias), após a imersão em água e após 30 minutos de abertura de colas para ladrilhos. Em suma, os resultados demonstraram viabilidade na utilização de cinzas de fundo em argamassas adesivas, no entanto, as elevadas taxas de incorporação provocaram alterações, nomeadamente, na resistência adesiva da argamassa após 30 minutos de abertura de colas para ladrilhos (Modolo *et al.*, 2015).

Outros autores (de Azevedo *et al.*, 2018) averiguaram a utilização de lamas primárias na produção de argamassas de cal. Determinaram a atividade pozolânica do resíduo, bem como, a sua composição química. Com base nas propriedades no estado fresco (consistência, densidade, retenção de água e temperatura de hidratação) e endurecido (resistência à flexão e compressão (7, 14 e 28 dias), absorção à água e capilaridade) das argamassas com resíduo (até 20%) e sem resíduo, permitiram concluir que este resíduo pode substituir parcialmente a cal até 10% sem comprometer as diferentes propriedades analisadas.

A valorização de outros resíduos da indústria de pasta e papel também foi estudada na produção de clínquer de cimento. (Buruberry, Seabra e Labrincha) utilizando cinzas volantes, lama de cal e lamas secundárias ou biológicas na produção de clínquer. Este clínquer foi depois usado para produzir um cimento para argamassas de reboco. Nas argamassas formuladas avaliaram a consistência, a resistência à compressão (7, 28 e 90 dias de cura) e a densidade. O estudo envolveu a produção de onze composições diferentes de clínquer e escolheram uma formulação para produzir um cimento do tipo CEM II A-L (80 a 94% de

clínquer, 6 a 20 de calcário e 0 a 5% de constituintes adicionais). O clínquer escolhido na produção do cimento era constituído por 30,6% de lama biológica, 49% de lama de cal e 20,4% de cinzas volantes e com uma temperatura de clinquerização de 1350°C. A argamassa desenvolvida era composta por 71,4% de areia, 14,3% de filler calcário, 11,6% de água e 14,3 deste cimento (com 80, 16 e 4% de clínquer, lama de cal e gesso, respetivamente. Os resíduos apresentaram compatibilidade química com os materiais tradicionais utilizados na produção de clínquer. Além disso, a temperatura de produção deste clínquer foi reduzida em 60°C (1450°C para 1390°C). Por fim, a resistência da argamassa cumpria com os requisitos duma argamassa de reboco (Buruberry *et al.*, 2015).

(Castro *et al.*, 2009) analisaram a produção de clínquer com *dregs*. A incorporação deste resíduo (0,13%) correu numa unidade industrial e monitorizaram as emissões gasosas do processo, bem como, a composição química e a libertação de substâncias (teste de lixiviação) nas amostras produzidas. Deste modo, os resultados obtidos demonstraram viabilidade técnica e ambiental na produção de clínquer, porém a taxa de incorporação deve ser baixa para cumprir os limites legais de libertação de substâncias na atmosfera (SO₂). Também analisaram a produção de clínquer com *grits* e a incorporação do resíduo (0,25%) numa unidade industrial e os resultados obtidos demonstraram também a viabilidade técnica e ambiental da sua introdução na produção de clínquer.

Outros autores (Simão *et al.*, 2017) usaram lama de cal, cinza volantes e lama do tratamento de efluentes na produção dum eco-clínquer e um eco-cimento (95% de clínquer e 5% de gesso) e uma eco-argamassa. O eco-clínquer foi testado com diferentes temperaturas de clinquerização (1350, 1400 e 1455°C) e a melhor formulação tinha 2% de lama do tratamento de efluente, 69% de lama de cal e 29% de cinzas volantes e obtida a 1455°C de temperatura de clinquerização. Assim, o resultado da resistência à compressão (28 dias) da argamassa com o eco-cimento ficou dentro dos limites impostos pelas normas em vigor.

(Ahmadi e Al-Khaja, 2001) estudaram a incorporação da lama resultante do tratamento de efluente num betão para produção de alvenaria não estrutural. O resíduo foi caracterizado química e fisicamente, de acordo com a norma BS 6463, e substituiu parcialmente a areia fina (3, 5, 8 e 10%). O traço de referência do betão tinha um traço 1:3:6 (cimento, areia e agregado grosso (10mm), 330kg/m³ de cimento e uma razão de 0,6 (água/cimento). Após o tempo de cura (28 dias), determinaram a resistência à compressão e à tração, a absorção de

água, a densidade e verificaram que o resíduo pode ser incorporado até 5% sem interferir na resistência à compressão do betão.

(Barbosa *et al.*, 2013) investigaram a substituição parcial de cimento e agregados naturais (areia e brita) por cinzas de fundo e cinzas volantes, respetivamente, na produção de betão. O betão de referência era formado por cimento (CEM IV/A (V) 32,5 N), areia, brita calcária (10mm) e água, enquanto os betões com resíduos incorporavam cinzas de fundo (10, 20 e 30%) e cinzas volantes (0, 9, 18 e 36%). Após a produção dos betões, determinaram a resistência à compressão (aos 28, 60 e 90 dias de cura), assim como, os parâmetros de lixiviação e ecotoxicológicos. Por fim, concluíram que o betão produzido pode incorporar até 10% de cinzas de fundo e 18% de cinzas volantes sem comprometer a resistência do betão e, além disso, emitiam baixos níveis de elementos lixiviados e ecotoxicológicos, relativamente ao betão de referência.

(Madrid *et al.*, 2018) avaliaram o uso de lama de cal e serradura da indústria de pasta e papel na produção de blocos de betão com propriedades térmicas melhoradas. A mistura referência era formada por cimento (180 Kg/m³), agregado fino 0/4 (1900 Kg/m³), agregado grosso 2/6 (500Kg/m³), água (72 Kg/m³) e superplastificante (1,80Kg/m³). As misturas com resíduos incorporam 5% de serradura e 5+15% de serradura e de lama de cal, respetivamente. A lama de cal e a serradura substituíram parcialmente o cimento e o agregado fino, respetivamente, e os resultados da resistência à compressão e da capilaridade das misturas com resíduos cumpriam os limites impostos pelos regulamentos espanhóis da capacidade de carga para alvenaria de blocos de betão.

Os estudos de valorização dos resíduos da indústria da pasta e do papel não estão restringidos apenas ao betão de agregados correntes. Neste sentido, em 1999, (Hauser, Eggenberger e Mumenthaler) usaram betão celular autoclavado para valorizar cinzas volantes. Os autores utilizaram dois tipos de cinzas volantes (“*lime-sulfate ash* e *Al-bearing ash*”) A cinza do tipo “*lime-sulphate ash*” contém principalmente cal livre e anidrite, enquanto a cinza do tipo “*al-bearing ash*” possui menos cal e sulfato, mas contém grandes quantidades de aluminato de cálcio reativo e silicato de cálcio pouco reativo. A mistura de referência era composta por areia, cal, sulfato, cimento e agente formador de poros e cada material representava 60%, 11%, 4% 25% e 0,06% do peso total, respetivamente. Os resíduos substituíram a cal e o sulfato. Após a produção dos diferentes betões, avaliaram a resistência à compressão, o teor de humidade, a densidade, a retração e a composição

mineralógica. A partir dos resultados anteriores, aferiram que a cinza do tipo “*lime-sulphate ash*” pode ser utilizada no betão celular autoclavado, mas a utilização da cinza do tipo “*al-bearing ash*” era inviável (Hauser *et al.*, 1999).

No trabalho desenvolvido por (Novais *et al.*, 2018), utilizaram-se os *dregs* pela primeira vez como filler na produção de argamassas geopoliméricas. A incorporação do resíduo (0, 10, 15, 20 e 25% na argamassa foi avaliada no estado fresco (trabalhabilidade da argamassa e cinética do geopolímero) e endurecido (resistência mecânica, absorção de água, e absorção de água por capilaridade). Deste modo, a incorporação dos *dregs* nesta argamassa não prejudica a fase de geopolimerização e torna viável a sua utilização. Contudo, as amostras com taxas maiores de resíduo obtiveram um decréscimo na trabalhabilidade e na absorção de água, bem como um aumento na resistência mecânica à tração e à compressão.

Estes autores (Novais *et al.*, 2019) avaliaram também a resistência da argamassa a longo prazo (270 dias) e o comportamento de lixiviação dos metais pesados. Ao nível dos ensaios de lixiviação, os elementos maiores (chumbo, níquel e cobalto) ficaram retidos na matriz do geopolímero, e os elementos menores (crómio e cobre) cumpriam os valores limite de contaminação de solos. Esta solução utiliza cerca de 194kg de *dregs* para se produzir uma tonelada de argamassa.

Na investigação desenvolvida por (Saeli *et al.*, 2017), estes autores avaliaram a produção de ligantes geopoliméricos que continham cinzas volantes e metacaulino na sua constituição. A produção do ligante geopolimérico dividiu-se em três fases. Na primeira fase determinaram a taxa “ótima” de utilização do resíduo e analisaram a resistência à compressão (28 dias), a absorção de água, a densidade aparente e o aparecimento de eflorescências. Depois, numa segunda fase otimizaram o teor de ativador alcalino, enquanto na última fase examinaram o efeito da distribuição de partícula do resíduo no ligante. Por fim, produziram a formulação otimizada de acordo com a norma EN 1015-11 e os resultados obtidos enquadraram-se na classe M20 das argamassas, de acordo com a norma EN 998-2. Assim, a composição otimizada era composta por 70% de cinzas volantes e o quociente entre os ativadores de hidróxido de sódio e de silicato de sódio é igual 1:3.

A formulação otimizada esteve na base da investigação realizada por (Saeli *et al.*, 2019a). Estes autores introduziram cinco teores diferentes (1, 2, 3, 4 e 5%) de areia siliciosa (agregado) na argamassa e avaliaram o seu comportamento, através da trabalhabilidade, densidade, absorção de água, capilaridade, resistência à compressão e à flexão (28 dias). O

desempenho das argamassas foi superior à categoria mínima admissível (M10) para aplicações estruturais, mas o melhor desempenho foi obtido no traço 1:3. Depois, produziram esta formulação com diferentes quantidades de água (0; 0,5; 1 e 2%) e avaliaram o efeito da água. Os resultados da adição da água revelaram um aumento da porosidade e da absorção à água, e uma diminuição da resistência à compressão das argamassas aos 60 dias.

Alguns autores (Saeli *et al.*, 2019b) estudaram a viabilidade da utilização de *grits* como agregado em argamassas geopoliméricas. A otimização da formulação do ligante para os geopolímeros foi obtida numa investigação anterior (Saeli *et al.*, 2017). As novas argamassas geopoliméricas incorporaram os *grits* com granulometria de agregado grosso (12,5 - 8 e 8 - 4), fino (4 - 2 e 2 - 1) e muito fino (1 - 0,5 e 0,5 - 0,063) e a razão de ligante/agregado variava entre 1:1 e 1:4. Paralelamente, a fração muito fina dos *grits* (1 - 0,5 e 0,5 - 0,063) foi usada entre 2,5 e 40% do peso na razão do ligante/agregado. Após a produção das argamassas, avaliaram o seu desempenho, através da trabalhabilidade, densidade, absorção de água, capilaridade, resistência à compressão e à flexão (28 dias). Os resultados da resistência à compressão mostraram viabilidade (>10 MPa) na utilização da argamassa em alvenarias, de acordo com a norma EN 998-2, exceto na argamassa da fração 1 - 0,5 e 0,5 - 0,063 e no traço 1:4 e 1:2, respetivamente.

No trabalho desenvolvido por (Saeli *et al.*, 2018), estudaram a utilização de cinzas volantes (da central de biomassa) e *grits* na produção de betão geopolimérico. As cinzas foram utilizadas como fonte de alumínio-silicatos e os *grits* usados como agregado. No total produziram nove composições diferentes, onde variava a dimensão máxima dos *grits* (1,5 e 5mm). Esta dimensão entrava em separado e em conjunto, e o traço entre ligante e agregado era de 1:1; 1:3; e 1:5. Depois de 28 dias de cura, os provetes foram testados à compressão e à flexão. Os resultados mostraram uma boa aptidão para estes betões geopoliméricos serem utilizados em aplicações construtivas sendo que a solução ótima era no traço 1:1.

Os seus trabalhos anteriores (Saeli *et al.*, 2018) (Saeli *et al.*, 2017)) serviram de referência na investigação desenvolvida posteriormente (Saeli *et al.*, 2019c). Aqui estes autores utilizaram a mesma porção de cinzas volantes (70%), mas estudaram a substituição da água destilada por um efluente alcalino (também resíduo) na produção de ligantes geopoliméricos. Portanto, na fase preliminar produziram vinte formulações diferentes, onde variaram a razão de hidróxido de sódio e o hidróxido sódio com efluente alcalino (100/0, 75/25, 50/50, 25/75 e 0/100). Após análise da etapa preliminar, produziram e testaram

diferentes argamassas, onde variaram o traço da argamassa (1/1, 1/3 e 1/5) e o traço entre o hidróxido de sódio com água destilada (0 e 1) e o hidróxido de sódio com efluente alcalino (0 e 1), mas o traço entre o líquido e o ligante foi constante (0,78). Os resultados da utilização do ligante com efluente alcalino foram idênticos ao do ligante de referência, sendo o traço “ótimo” da argamassa o de 1/3 (ligante/agregado).

3.4. Valorização de resíduos em materiais cerâmicos

Existem também vários estudos publicados até hoje que utilizam diferentes resíduos resultantes do processo produtivo de pasta e papel na produção de vários materiais cerâmicos, nomeadamente, em telhas, tijolos e agregados leves. Na Tabela 22 identificam-se os autores, os resíduos utilizados, a matéria-prima substituída e a área de aplicação.

Tabela 22. Identificação das soluções de valorização em materiais cerâmicos.

| Investigação desenvolvida por | Resíduos utilizados | Matéria-prima tradicional (*) | Área |
|---|--|-------------------------------|-----------------------|
| (Ribeiro dos Santos <i>et al.</i> , 2019) | <i>Dregs e Grits</i> (caracterização) | - | Produtos cerâmicos |
| (Vilarinho <i>et al.</i> , 2009) | <i>Dregs</i> | Argila | Agregados leves |
| | <i>Grits</i> | Argila | |
| (Tai e Chen, 2020) | Lama do tratamento do efluente | Lama de reservatório | Revestimento cerâmico |
| | | Terra diatomácea | |
| (Siqueira e Holanda, 2018) | <i>Grits</i> | Calcário | |
| (Martínez <i>et al.</i> , 2012) | Lama do tratamento do efluente | Argila | Tijolos |
| | Resíduos de papel | | |
| (Kizinievič <i>et al.</i> , 2018) | Lamas primárias | Argila | |
| (Cusidó <i>et al.</i> , 2015) | | | |
| (Vieira <i>et al.</i> , 2016) | Lama do tratamento do efluente | Argila | |
| (Muñoz <i>et al.</i> , 2020) | | Laterite | |
| (Goel e Kalamdhad, 2017) | | Solo de aluvião | |
| (Qin <i>et al.</i> , 2015) | Lama de cal | - | Anortite |
| | Cinza Volante | | |

(*) Matéria-prima tradicional substituída ou utilizada nos diferentes trabalhos de investigação.

Numa fase preliminar, (Ribeiro dos Santos *et al.*, 2019) caracterizaram os *dregs* e os *grits* de modo a avaliar a compatibilidade com os agregados tradicionais usados na produção de produtos cerâmicos. Os resultados da composição química e mineralógica (por DRX e FRX) dos resíduos demonstraram que possuíam um alto teor de carbonato de cálcio (calcite), porém os *dregs*, continham também carbonato de sódio e de magnésio bem como alguma

matéria orgânica. Ao nível da caracterização física e morfológica, os *dregs* tem um menor tamanho de partícula fina e uma maior área superficial do que os *grits*. Assim, a caracterização e incorporação dos *dregs* e *grits* em pastas cerâmicas demonstrou ser viável a incorporação em produtos cerâmicos (Ribeiro dos Santos *et al.*, 2019).

(Vilarinho *et al.*, 2009) avaliaram a incorporação de *dregs* e de *grits* na produção de agregados leves de argila expandida. Da análise e produção das formulações com estes resíduos, verificaram que estes não precisavam de nenhum pré-tratamento. Além disso, durante a fase laboratorial, avaliaram a perda ao fogo (900°C) e os resultados sugeriram uma incorporação até 2% e 5% de *dregs* e *grits*, respetivamente. Por fim, as misturas foram testadas a uma escala industrial com monitorização de parâmetros ambientais (CO, NO_x, SO₂, HF HCL, concentração de partículas, e o conteúdo de componentes voláteis orgânicos) e de parâmetros de lixiviação. Os produtos obtidos industrialmente cumpriram com os requisitos especificados para agregados de argila expandida, também respeitando os limites ambientais exigidos. Porém, os agregados leves com *grits* apresentaram contaminações de carbonato de cálcio na argila expandida, o que pode tornar estes agregados leves mais frágeis. Esta limitação poderá ser resolvida com uma moagem mais fina dos *grits*.

As lamas do tratamento de efluente também foram testadas na produção de agregados leves de base cerâmica (argila expandida). (Tai & Chen, 2020) estudaram a viabilidade deste agregado leve com lama do tratamento de efluente. O resíduo substituiu parcialmente (90, 80, 70, 60 e 50%) a lama de reservatório ou terra diatomácea e cada formulação foi sintetizada a 800, 900 1000 e 1100°C por 5, 10, 15 e 20 minutos. Na fase preliminar, os resultados da granulação e da cozedura revelaram que o resíduo pode ser adicionado à lama de reservatório e ser sintetizado a 1000 e 1100°C por 5, 10 ou 15 minutos, mas nas formulações com a terra diatomácea, a formação acontece com 50 e 60% de resíduo. Após a avaliação da densidade, perda de massa, resistência à compressão, topografia da superfície e a resistência de esmagamento, verificaram que o resíduo pode ser utilizado na produção destes materiais de construção, e contribuir para reduzir o consumo de matérias-primas tradicionais.

Outros autores (Siqueira e Holanda, 2018) avaliaram a utilização de *grits* também na produção de revestimento de cerâmico de parede. A formulação padrão era formada por caulino (70%), quartzo (15%) e calcário (15%) enquanto, nas formulações alternativas com resíduo, o calcário era substituído por 5, 10 ou 15% de *grits*. Antes da cozedura, as matérias-

primas foram caracterizadas química e mineralogicamente. Durante a produção, as formulações foram misturadas com 7% de água e prensadas através de uma carga uniaxial de 50MPa. Depois da secagem, a retração verde-seco foi avaliada e a cozedura foi efetuada neste estudo a diferentes temperaturas (1100, 1120, 1140, 1160 e 1180°C). Após a cozedura, a retração seco-cozido, a densidade, a absorção de água, as curvas dilatométricas, as fases cristalinas e a resistência à flexão foram determinadas. Pela análise dos resultados obtidos, verificaram que os *grits* podiam substituir totalmente o calcário na formulação do revestimento e permitir a produção de revestimentos de cozimento rápido e único do grupo BIII, segundo a norma ISSO 13006, e num intervalo de cozedura entre 1100° a 1180°C.

Vários investigadores estudaram a valorização da lama resultante do tratamento do efluente da indústria de pasta e papel, na produção de tijolos cerâmicos. (Martínez *et al.*, 2012) averiguaram a substituição de argila por lamas do tratamento do efluente e também por resíduos de papel na produção de tijolos cerâmicos. Os resíduos substituíram a argila em diferentes percentagens (entre 0 e 10%) e as pastas foram sinterizadas a 950°C. Após a produção, determinaram a retração linear, a perda de massa por ignição, a densidade, a absorção de água, a resistência à compressão e a condutividade térmica. Por fim, verificaram que o melhor desempenho em termos da condutividade térmica estava na formulação com 6% de resíduo e que, além disso, a absorção à água e a resistência à compressão cumpriam os valores impostos pela regulamentação.

(Kizinievič *et al.*, 2018) estudaram a utilização de lama de tratamento primário na produção de tijolos cerâmicos. A composição de referência era constituída por 90% de argila e 10% de areia e um teor de água de 22% para se fazer a pasta cerâmica. Nas composições alternativas com o resíduo, a argila foi substituída parcialmente por 5, 10, 15 e 20% de lama primária e, para conformar os tijolos, estas pastas necessitaram de 25, 27 e 29% de humidade, respetivamente. Durante este estudo, a cozedura das diferentes composições ocorreu entre os 900 e 1000°C, e foram medidas a retração verde-seco e seco cozido, a densidade, a resistência à compressão, a absorção à água, a porosidade aberta e os valores de lixiviação dos metais pesados. Após análise dos resultados, verificaram que a produção de tijolos podia incorporar até 5% e 15% de lama primária, para 900 e 1000°C de cozedura, respetivamente, sem comprometer as características e desempenho dos tijolos cerâmicos.

Na investigação desenvolvida por (Goel e Kalamdhad, 2017), (Vieira *et al.*, 2016) e por (Cusidó *et al.*, 2015), estudaram também a valorização de lamas do tratamento de efluente

da indústria de pasta e papel, na produção de tijolos. As pastas de referência e as pastas com resíduo (de 10 a 25% de substituição) foram cozidas entre os 850 e 980°C, tendo sido determinadas um conjunto de propriedades fulcrais como a retração seco-cozido, a resistência à compressão, a absorção de água, e a densidade para além de avaliarem o aparecimento de eflorescências. Em suma, apuraram que a qualidade dos tijolos era garantida até 15% de incorporação de lamas do tratamento de efluente sem aparecimento de eflorescências à superfície e sem comprometer as propriedades mecânicas e ambientais (da produção e aplicação).

Outros autores (Muñoz *et al.*, 2020), estudaram também a viabilidade da lama do tratamento de efluente da indústria da pasta de papel na produção de tijolos. Os tijolos foram cozidos a 900°C e incorporaram 0, 5, 10, 15 e 20% de lama. Após a cozedura, determinaram a retração linear, a absorção à água, a porosidade aparente, a densidade, a resistência à compressão e à flexão, a condutividade térmica, a difusividade térmica e a lixiviação. Deste modo, os tijolos podem incorporar até 10% de lama, sem prejudicar os limites imposto pela norma de produto, além disso, a condutividade térmica era reduzida em 5%, relativamente ao tijolo de referência.

No caso das lamas resultantes do tratamento de efluente da indústria de pasta e papel, os investigadores (Cernec *et al.*, 2005) avaliaram a estabilidade química e microbiológica das lamas, no inverno e no verão, pensando na fiabilidade do fornecimento deste resíduo como matéria-prima alternativa para outra indústria. Verificaram ao longo do tempo que o resíduo pode ser considerado estável quimicamente e microbiologicamente, de modo a ser incorporado na produção de tijolos cerâmicos.

O uso de lama de cal e cinzas volantes foi estudado na produção de anortite para a indústria cerâmica. Cada formulação possuía 36, 40, 50 e 60% de lama de cal e 64, 60, 50 e 40% de cinzas volantes e foram cozidas a 900, 1000, 1050, 1100, 1150, 1200 e 1250°C. Depois, cada formulação foi caracterizada, através da determinação da densidade, absorção à água, resistência à compressão, teor de cal e composição mineralógica. Os resultados demonstraram que a composição com 36% de lama de cal, 64% de cinzas volantes e sintetizada aos 1100°C, apresentava a maior fase de anortite e poderia ser utilizada na produção de revestimentos de parede e de filtros cerâmicos porosos (Qin *et al.*, 2015).

3.5. Valorização em outros materiais de construção

A inovação tem aparecido também em outros materiais de construção e estes novos materiais podem funcionar como teste de experimentação das soluções de valorização de resíduos como matérias primas alternativas às naturais. Já existem alguns estudos de investigação que utilizaram diferentes resíduos resultantes do processo produtivo de pasta e papel como matéria-prima para novos produtos. Na Tabela 23 identificam-se os autores, os resíduos utilizados e a área de aplicação.

Tabela 23. Identificação das soluções de valorização em outros materiais de construção.

| Investigação desenvolvida por | Resíduos utilizados | Matéria prima tradicional (*) | Área |
|--------------------------------------|---|--------------------------------------|------------------------|
| (Siqueira e Holanda, 2013) | <i>Grits</i> | Cimento | Tijolos solo-cimento |
| (Azevedo <i>et al.</i> , 2019) | Lamas do tratamento do efluente | Solo e areia | Pozolanas |
| (Jang <i>et al.</i> , 2018) | <i>Dregs</i> | - | Compósitos |
| (Mymrin <i>et al.</i> , 2016) | <i>Grits</i> Lama de cal | - | Mineira |
| (Mäkitalo <i>et al.</i> , 2014) | <i>Dregs</i> | - | |
| (Jia <i>et al.</i> , 2014) | <i>Dregs</i> Lama de cal Cinza de Cal | - | |
| (Mäkitalo <i>et al.</i> , 2015) | <i>Dregs</i> | Material de selagem do aterro | |
| (Modolo <i>et al.</i> , 2011) | Lama Primária (fibras) | Fibras da madeira de resinosas | Fibrocimento |
| (Donmez Cavdar <i>et al.</i> , 2017) | Lama primária Lama secundária | Aparas de madeira e cimento | Painel madeira-cimento |

(*) Matéria prima tradicional substituída ou utilizada nos diferentes trabalhos de investigação.

(Siqueira e Holanda, 2013) estudaram a incorporação em tijolos de solo-cimento de um resíduo particular resultante dos processos de lixiviação da pasta de papel, os *grits*. Além deste resíduo, usaram solo e cimento para fazer blocos com um traço de solo-cimento de 9:1. Antes da produção, determinaram a composição química e mineralógica, a perda ao fogo (LOL), a distribuição granulométrica, o índice de plasticidade, a atividade pozolânica, e a composição do lixiviado e de solubilização. Os *grits* foram colocados em substituição parcial do cimento e produziram quatro formulações (0, 10, 20 e 30% de resíduo). Após o tempo de cura (28 dias), avaliaram a absorção de água, a densidade aparente, a resistência à compressão e a retração volumétrica. Após a análise dos resultados obtidos, aferiram que os tijolos solo cimento até 20% de *grits* poderiam ser usados como materiais de construção.

(Azevedo *et al.*, 2019) estudaram a viabilidade da incorporação de lama do tratamento do efluente na produção de blocos do tipo solo-cimento. Durante a investigação, produziram

uma mistura simples (10% de cimento+90% de solo) e uma mistura de referência com três matérias-primas (10% de cimento+63% de cimento+27% de areia). A inclusão da areia resulta dum processo de correção da mistura, devido à alta percentagem de argila no solo que causa uma baixa estabilidade da mistura. As misturas com resíduo foram também corrigidas com a areia e as matérias-primas (solo+areia) foram substituídas parcialmente por 5, 10 e 15% de resíduo. Esta percentagem de incorporação substitui 70% e 30% do solo e da areia, respetivamente. Após a produção, determinaram a resistência mecânica (7, 14 e 28 dias de cura), a absorção à água e a perda de massa e verificaram que as propriedades eram otimizadas com a incorporação de um teor de 10% de resíduo.

(Jang *et al.*, 2018) investigaram a produção de pozolanas através da calcinação da lama do tratamento de efluente da indústria de pasta e papel. Na primeira fase de produção, aplicaram diferentes temperaturas (500, 600, 700, 800, 900 e 1000°C) e tempos de calcinação (1, 2, 5 e 12 horas), bem como, diferentes métodos de arrefecimento (no forno, à temperatura ambiente e na água). Após a caracterização inicial da composição química e mineralógica, determinaram o índice de atividade pozolânica e compararam-no com o índice das cinzas volantes comerciais e das escórias de alto forno. Por fim, avaliaram a atividade pozolânica da lama calcinada na argamassa, através do índice de atividade de força e o consumo de hidróxido de cálcio e verificaram que a lama calcinada a 700°C durante duas horas, e arrefecida em água cumpria os requisitos exigidos para as cinzas volantes (classe F).

No trabalho desenvolvido por (Mymrin *et al.*, 2016), usaram quatro resíduos na produção de um compósito. O compósito era formado por três resíduos do sector de pasta e papel (*dregs*, *grits* e lama de cal), enquanto, o outro resíduo, designado por resíduo da produção de cal, provinha da produção de cal e funcionava como um componente de ligação. Antes da produção, determinaram a distribuição de partícula, a composição química e mineralógica, e a estrutura morfológica das matérias-primas. Depois, produziram dez formulações diferentes, onde a taxa de incorporação variava entre 25 e 35% de *dregs*, 25 e 39% de *grits*, 14 e 30% de lama de cal, e 10 e 25% do resíduo da produção de cal. Os provetes foram misturados, hidratados e homogeneizados e, depois, prensados a 10 MPa. Após a compactação, permaneceram ao ar durante 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias, e determinaram a resistência axial, o coeficiente de expansão, a densidade, a absorção à água aos 28 e 90 dias, o coeficiente de resistência à água aos 28 e 90 dias, a composição mineralógica e química e a estrutura morfológica. Por fim, verificaram que os melhores resultados estavam na

formulação com 25, 30, 20 e 25% de *dregs*, *grits*, lama de cal e resíduo da produção de cal, respetivamente.

Ao longo dos anos, vários trabalhos de investigação científica têm sido publicados sobre a utilização de resíduos do sector da pasta e do papel no tratamento e prevenção da drenagem ácida de minas. (Mäkitalo *et al.*, 2014) avaliaram o uso de *dregs* na selagem de camadas em aterros de minas (*mine tailings*). O trabalho laboratorial envolveu a caracterização física, química e mineralógica dos *dregs* para determinar as variações entre lotes e, depois, analisaram a viabilidade da solução desenvolvida. No caso da caracterização química, determinaram a composição química, o poder tampão e a libertação de substâncias perigosas. Também produziram amostras cilíndricas com *dregs* para avaliar a resistência à compressão, após um mês de cura a 5° C e sujeitos a uma carga de 20 kPa. Os valores apresentados eram adequados, apresentando as misturas com *dregs* baixa condutividade hidráulica e uma alta capacidade de retenção de água. Além disso, o teor dos lixiviados não representavam nenhum problema ambiental.

(Jia *et al.*, 2014) testaram, para além de *dregs*, outros resíduos da indústria de pasta e papel (cinzas volantes e lamas de cal) também na camada de selagem de um aterro de *mine tailings* (rejeitos de minas). Especificamente avaliaram o efeito da utilização destes resíduos de pasta e papel na redução da mobilidade de microelementos e na neutralização do resíduo mineiro. Para além de o caracterizarem mineralogicamente, realizaram testes de lixiviação em duas fases (antes da aplicação dos resíduos no aterro e após a selagem do aterro). Identificaram os metais no lixiviado e nos resíduos através de espectrometria de emissão atómica com plasma atómico indutivo, tendo, de seguida, calculado o teor de lixiviados e dos elementos não lixiviados. Assim, verificaram que as concentrações da maioria dos microelementos permaneciam nos *mine tailings* não oxidados e que a utilização dos resíduos de pasta e papel provocou condições similares na estabilização de microelementos.

Os *dregs* também foram estudados por (Mäkitalo *et al.*, 2015) a nível industrial para avaliar o seu comportamento na selagem de camadas de aterros mineiros. Numa primeira fase estudaram a taxa de incorporação de *dregs* na mistura de solo e *dregs*, tendo determinado a densidade máxima seca, a porosidade, o teor ótimo de água e a compactação do solo (*Proctor*), de quatro composições diferentes (solo/*dregs* a 90/10, 80/20, 70/30 e 50/50). Desta fase, resultou a incorporação máxima de 20% de *dregs* na camada de selagem. Numa segunda fase, produziram três composições diferentes de solo/*dregs* (95/5; 90/10;

85/15), através da utilização duma central de asfalto e dum. moinho, tendo avaliado a densidade, o teor em água, a compactação, a condutividade hidráulica e a capacidade de retenção à água destas misturas. Em resumo, os resultados demonstraram a possibilidade de produzir misturas homogéneas para selagem de aterros mineiros e, a melhor solução era a mistura com 10% de *dregs* misturada na central de asfalto (Mäkitalo *et al.*, 2015).

O sector do fibrocimento também foi alvo de testes à escala industrial como um potencial consumidor de resíduos da indústria da pasta e do papel, nomeadamente, das fibras presentes nas lamas primárias (Modolo *et al.*, 2011). A incorporação das lamas ocorreu numa unidade industrial de produção de telhas de fibrocimento e, durante a produção, verificaram-se vários aspetos relacionados com o controlo ambiental e produtivo, a qualidade do produto final e a viabilidade económica da solução desenvolvida. No produto final foi determinada a carga de rutura, o momento fletor, a densidade e a humidade. As formulações das telhas com resíduo continham 25% de fibras de lama primária e os resultados obtidos demonstraram que à escala industrial cumpriram os requisitos específicos deste tipo de produto, trazendo benefícios quer ao do resíduo através da redução de custos de aterro e ao produtor das telhas, e através da redução de custos de aquisição de matéria-prima natural e sua poupança, respetivamente (Modolo *et al.*, 2011).

(Donmez Cavdar *et al.*, 2017) avaliaram a viabilidade de utilização de lamas primárias e secundárias na produção de painéis de compósito madeira-cimento. A solução de referência era constituída por cimento e aparas de madeira, água e cloreto de cálcio e o traço madeira/cimento era de 1/3. As formulações com resíduo continham 5, 10, 15 e 20% de lamas. Após a produção dos painéis compósitos, foi avaliado o inchamento, a espessura, a absorção à água, o modulo de elasticidade e o módulo de rotura após quatro semanas de cura (a 20°C e 65% de humidade relativa). Verificaram que as amostras podiam incorporar até 5, 10 e 20% de lamas primária, de mistura de lamas ou de lamas secundárias, respetivamente, de modo a que fossem cumpridos os requisitos impostos pela norma deste produto (EN 634-2).

Em síntese, uma visão geral deste capítulo 3 permite concluir que existem diversos trabalhos de nível laboratorial e, alguns à escala piloto industrial, que apontam para a viabilidade técnica da utilização de resíduos da indústria de pasta e papel, mas também de outros sectores industriais, como matérias primas alternativas às naturais em diferentes tipos

de produtos, por exemplo, em materiais de construção. Contudo, esta é uma abordagem que necessita que se tenha em consideração outros aspetos, nomeadamente, os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, os fatores críticos na passagem da escala laboratorial à escala real de produção ou, ainda, os fatores relacionados com um modelo de negócio circular em oposição ao corrente modelo de economia linear em que recursos naturais (energia, água e materiais) são simplesmente extraídos, transformados, consumidos e rejeitados no final do tempo de vida útil dos produtos. A abordagem que esta tese pretende fazer vai ao encontro de procurar esta aproximação a um modelo circular em casos simples, para poder avaliar e apreciar os fatores acima referidos num contexto de eco-inovação.

Capítulo 4

***Uso da avaliação de ciclo de vida como
ferramenta de eco-inovação***

4. Uso da avaliação de ciclo de vida como ferramenta de eco-inovação

4.1. Avaliação de ciclo de vida – metodologia e programas de apoio

No âmbito da construção sustentável, a escolha dos materiais não deve ser realizada de forma casuística e isenta da avaliação dos impactos ambientais provocados por eles. Assim, à partida, é impossível saber se um determinado material como o betão é mais amigo do ambiente do que outro como o aço. O primeiro usa materiais locais e pode incorporar vários resíduos industriais, enquanto o segundo, pode ser reciclado infinitamente, mas a sua produção consome muita energia (Torgal e Jalali, 2008). A sustentabilidade é sempre um conceito relativo que dependerá de muitos fatores locais ou globais. A escolha de materiais ou de matérias-primas devem ser feitas tendo em consideração os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida. Este pensamento de ciclo de vida (*life-cycle thinking*) engloba duas abordagens metodológicas como a avaliação de ciclo de vida (ACV) e a análise de custos no ciclo de vida (CCV). No modelo de economia circular de suporte ao eco-design e uso de produtos, a seleção de materiais ou matérias-primas deve estar condicionada e apoiada pelos resultados da ACV e CCV (Thelen *et al.*, 2018), enquanto ferramentas de eco-inovação, ou seja, de inovação orientada pela sustentabilidade.

A produção de produtos e os serviços associados consomem recursos naturais e podem emitir poluentes e gases de efeito estufa, durante todo o ciclo de vida. A quantificação dos impactos ambientais pode ser realizada através da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV). Esta técnica permite diferenciar as escolhas mais ou menos favoráveis, de modo a transformar a sociedade e a economia num modelo mais sustentável (Hasan *et al.*, 2019; Kalverkamp *et al.*, 2020).

A avaliação de ciclo de vida (ACV) encontra-se normalizada pela norma ISO 14040 (*Gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida, princípios e estrutura básica*) que a define como a “*compilação dos fluxos e saídas e a avaliação dos impactos ambientais associados a um produto ao longo do seu ciclo de vida*”. Esta norma define a ACV como “*estudos consecutivos e interligados de um produto, desde a extração de matérias-primas ou transformação de recursos naturais, até à deposição final do produto na natureza*”. (Ferrão, 2009; IPQ, 2008; Sala *et al.*, 2016).

Além da norma ISO 14040, existem um conjunto de normas dessa série que regulam outros aspetos da avaliação do ciclo de vida, como se pode ver na Tabela 24.

Tabela 24. Normas da avaliação de ciclo de vida (Ferrão, 2009).

| Referência | Título |
|------------|--|
| ISO 14041 | Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações. |
| ISO 14044 | Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e Orientações. |
| ISO 14047 | Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Exemplos de aplicação da ISO 14042. |
| ISO 14048 | Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: Formatação da apresentação de dados. |
| ISO 1409 | Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida: exemplos de aplicação ISSO 14041, na definição do objetivo, âmbito e inventário de ciclo de vida. |

A técnica de ACV considera todas as etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço para quantificar e avaliar os impactos ambientais associados, ou seja, avalia etapas desde a extração (aquisição) de matérias-primas e auxiliares até à produção, utilização e fim de vida (Almeida, 2018). De acordo com a norma ISO 14040, a metodologia de avaliação de ciclo de vida estrutura-se em quatro fases (Almeida, 2018; IPQ, 2008) (Figura 15):

- *Definição do objetivo e do âmbito* – Nesta etapa descreve-se o produto, processo, ou atividade em estudo e da aplicação pretendida, finalidade do estudo, o público-alvo (recetor dos resultados do estudo). Além disso, identifica-se os limites (fronteiras do sistema), a unidade funcional.
- *Inventário de ciclo de vida* – Esta etapa envolve a recolha, identificação e quantificação de entradas e saídas para um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida (consumos de matérias-primas e energia, resíduos e emissões para ambiente).
- *Avaliação dos impactos ambientais* – Esta etapa pretende compreender e avaliar os potenciais impactos ambientais para um sistema utilizando os resultados do inventário ciclo de vida (ICV). Neste momento, os dados de inventário são associados a categorias específicas de impacto ambiental e indicadores de categoria, de modo a compreender os impactos.
- *Interpretação dos resultados* – Nesta etapa, os resultados são avaliados de acordo com o objetivo e âmbito da ACV, de modo a obter conclusões e recomendações.

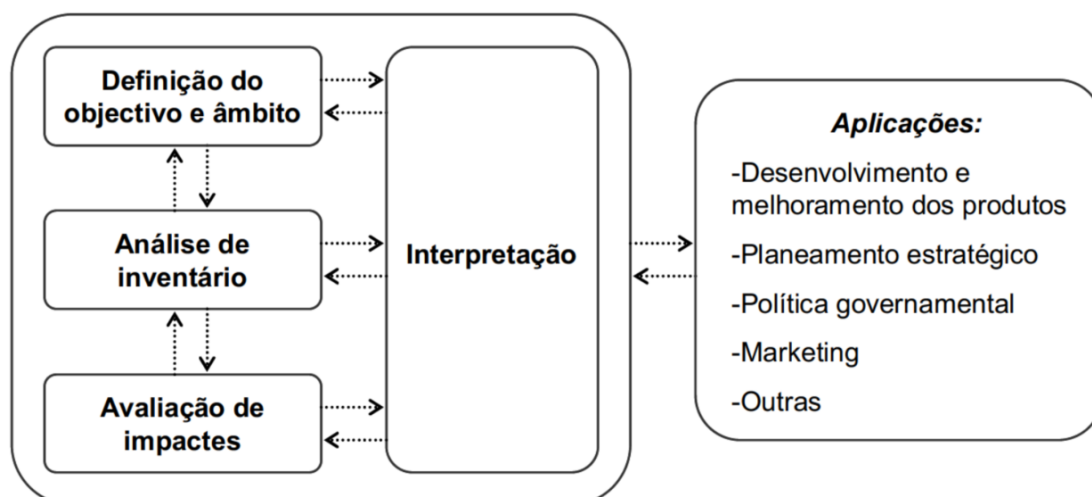


Figura 15. Fases de uma avaliação de ciclo de vida (Melo, 2013).

Na Tabela 25 apresentam-se os aspetos que devem ser esclarecidos, durante a aplicação da metodologia de ACV.

Tabela 25. Aspetos a considerar na definição do objetivo e no âmbito do estudo (Melo, 2013)

| Etapa | Aspetos | Etapa | Aspetos |
|--|--|-------------------------|---|
| Definição do objetivo do estudo | Aplicação pretendida | Âmbito do estudo | Tipo(s) de produto(s) e respetiva aplicação |
| | Limitações devido ao método e pressupostos utilizados | | Sistema ou processo que é estudado, as suas funções, unidade funcional e fluxos |
| | Motivos da realização do estudo | | Limites do sistema |
| | Publico alvo, ou seja, recetor da comunicação dos resultados do estudo | | Seleção das categorias de impacto e dos métodos ACV a aplicar |
| | Se os resultados se destinam a ser utilizados em afirmações comparativas para divulgação publica | | Seleção da qualidade dos dados e informações |
| | Identificação dos autores e coautores | | Planeamento da apresentação dos resultados |

Durante a aplicação da metodologia de ACV, os fluxos de entradas e saídas devem ser coerentes com a unidade funcional, ou seja, a unidade funcional é o elemento de ligação entre as entradas e saídas. Além disso, a comparação entre produtos está dependente da adoção da mesma unidade funcional entre produtos, de modo a garantir uma base comum de comparação (Melo, 2013).

A definição da fronteira na avaliação define os processos unitários a serem incluídos no sistema e clarifica o que está incluído e o que está excluído do estudo. Além disso, a fronteira

“ideal” deve ter fluxos elementares de entradas e de saídas. A escolha da fronteira deve ser baseada em vários tipos de fatores e de parâmetros (Ferrão, 2009; Melo, 2013), como:

1. Fluxos de matéria e de energia característicos dos processos unitários ao longo do ciclo de vida;
2. Produção e a utilização de combustíveis, de eletricidade e de calor;
3. Distribuição e transporte;
4. Utilização de produtos;
5. Eliminação dos resíduos do processo e dos produtos;
6. Recuperação de produtos já utilizados (inclui reutilização e reciclagem);
7. Utilização de recursos naturais;
8. Fabrico e a manutenção dos equipamentos;
9. Manufatura de materiais auxiliares ao processo principal;
10. Operações de manutenção, tais como a iluminação e o aquecimento.

Ao longo da ACV, a fronteira é dinâmica, ou seja, na fase inicial define-se uma fronteira e, em fase posterior, esta pode ser redesenhada de modo a implementar ou excluir processos considerados na primeira fronteira (Melo, 2013).

De uma forma resumida, a fase do inventário do ciclo de vida corresponde à recolha de dados que serão utilizados na terceira fase e pode ser classificado em quatro grandes grupos (Melo, 2013):

- Entradas de energia, entradas de matérias-primas, entradas auxiliares e outras entradas físicas;
- Produtos, coprodutos e resíduos;
- Emissões para o ar, descarga para a água e para o solo;
- Outros aspetos ambientais.

Após a recolha dos dados é necessário validar os dados recolhidos e relacionar com os processos unitários e com o fluxo de referência da unidade funcional. De seguida, a avaliação de impactos irá mostrar os impactos causados pelos fluxos de entradas e de saída de um sistema na saúde humana, de plantas e animais, ou a disponibilidade dos recursos naturais. Os resultados podem aparecer em função de várias categorias de impacto ambiental, nomeadamente, aquecimento global, depleção de recursos abióticos, depleção da camada de

ozono, eutrofização, oxidação fotoquímica, acidificação do solo e água (Almeida, 2018; Melo, 2013; Teixeira 2013), com a seguinte definição:

- Aquecimento global – Esta categoria reflete o aumento da temperatura do planeta devido ao aumento da absorção de radiação solar, resultante do efeito de algumas substâncias gasosas, nomeadamente dióxido carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), oriundas da atividade humana. Este aumento da temperatura gera efeitos prejudiciais nos ecossistemas, saúde pública e bem-estar animal. A unidade de avaliação é expressa em Kg CO₂ eq.
- Depleção de recursos abióticos – Esta categoria pode avaliar os recursos não renováveis e designa-se por depleção de recursos abióticos – elementos ou por depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis. Ao nível da interpretação, a categoria da depleção de recursos abióticos-elementos estima o uso de recursos não renováveis (minerais) considerando as reservas e a taxa de desacumulação e a unidade do parâmetro é Kg Sb eq. Enquanto, a depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis calcula o uso de recursos não renováveis (carvão, petróleo e gás natural) considerando as reservas e a taxa de desacumulação e a unidade do parâmetro é MJ, poder calorífico inferior.
- Depleção da camada de ozono – Esta categoria mostra a diminuição da camada de ozono resultante da reação de determinados gases provenientes da troposfera, nomeadamente CFC e HCFCs, que deixa passar as radiações ultravioletas até à superfície terrestre. Esta passagem prejudica a saúde humana, os ecossistemas aquáticos e os ciclos bioquímicos. O resultado é descrito Kg CFC-11 eq.
- Eutrofização – A dispersão de alguns macronutrientes (azoto, fósforo e potássio) nos compartimentos ambientais (ar, água e solo) influencia os ecossistemas terrestres e aquáticos. A unidade do parâmetro é Kg (PO)₄³⁻ eq.
- Oxidação fotoquímica – Esta categoria avalia a criação de substâncias reativas que são prejudiciais para a saúde humana e dos ecossistemas e que podem ainda danificar as colheitas. O resultado é medido em Kg C₂H₄ eq.
- Acidificação do solo e água – Esta categoria avalia o efeito do lançamento e dispersão de gases acidificantes (óxidos de azoto, dióxido de enxofre, e ácido clorídrico) no ar, na água e na terra, gerando danos no ecossistema, na saúde pública e nos materiais. A unidade de avaliação é Kg SO₂ eq.

Por vezes, a última fase da metodologia pode rever e reverter o objetivo da ACV, bem como, a qualidade e origem dos dados recolhidos no inventário, de modo a garantir a consistência com o objetivo definido. Além disso, as conclusões do estudo podem assumir a formato de conclusões e recomendações para os decisores (IPQ, 2008).

A metodologia da ACV recorre a vários programas informáticos desenvolvidos para calcular os impactos ambientais. O sector da construção possui varias ferramentas informáticas que permitem auxiliar a realização de avaliações de ciclo de vida (Pacheco Torgal e Jalali, 2007) Na Tabela 26 mostram-se algumas destas ferramentas informáticas e seu o campo de aplicação.

Tabela 26. Programas informáticos para ACV no sector da construção (Torgal e Jalali, 2008).

| Aplicação | Ferramenta Informática | |
|------------------------------------|------------------------|-------------|
| | Denominação | Origem |
| Aplicação geral a estudos de ACV | SimaPro | Holanda |
| | GaBI | Alemanha |
| Seleção de materiais | BEES | EUA |
| Conceção de edifícios | ATHENA | Canadá |
| | EcoQuantum | Holanda |
| | EnVest | Reino Unido |
| Sistemas de certificação ambiental | LEED | EUA |
| | BREEM | Reino Unido |
| | GBTool | Canadá |
| | Ecoprofile | Noruega |
| | Escale | França |
| | Ecoeffect | Suécia |

Ao longo dos últimos anos, a sociedade tem procurado novos produtos que consumam menos recursos naturais e diminuam a libertação de substâncias perigosas ao longo do ciclo de vida. Assim, a eco-inovação é *“qualquer forma de inovação que permite ou vise progressos significativos demonstráveis na consecução do objetivo de desenvolvimento sustentável, através da redução dos impactos no ambiente, do aumento da resiliência às pressões ambientais ou de uma utilização mais eficiente e responsável dos recursos naturais, sem que essas mudanças tenham obrigatoriamente intencionalidade ambiental, mas passando a poder constar em todas as atividades económicas”*(CE, 2014b; DRE, 2015). Deste modo, a avaliação de ciclo de vida pode ser utilizada como uma ferramenta de apoio e decisão na eco-inovação e nas suas escolhas.

4.2. Alguns estudos de ACV em materiais de construção

Alguns investigadores têm realizado avaliações de ciclo de vida (ACV) em materiais de construção, de modo a avaliar os impactos produzidos pela incorporação de resíduos como matérias-primas.

(Deviatkin *et al.*, 2016) avaliaram o desempenho ambiental de cinco abordagens à valorização das lamas de destintagem. No cenário base, as lamas eram depositadas em aterro, enquanto nos cenários de valorização, as lamas eram valorizadas na indústria cimenteira (em dois cenários), na produção de agregados leves e na produção de lâ de rocha. No caso da valorização na indústria cimenteira, as lamas substituíram 2,7% e 46% de calcário e coque, respetivamente, enquanto num segundo cenário, o resíduo substituíam calcário (1,9%) e argila (1,9%), mas antes da incorporação o resíduo precisava de ser incinerado. Nos outros casos, as lamas de destintagem substituíam 100% do fuel óleo pesado na produção de agregados leves e substituíam 25% do cimento na produção da lâ de rocha. Ao nível das categorias de impacto ambiental avaliadas, consideraram o aquecimento global, a depleção da camada do ozono, a ecotoxicidade terrestre, a acidificação, a depleção de recursos naturais e a eutrofização. No final, a interpretação dos resultados mostrou que o melhor cenário de valorização estava no primeiro caso de valorização na indústria cimenteira, no processo sem incineração, pois tiveram reduções nas categorias relativas ao aquecimento global e à eutrofização de cerca de 13 e 12%, respetivamente.

(Turk *et al.*, 2015) analisaram por ACV o desempenho ambiental de betões industriais com matérias-primas alternativas (areias de fundição, cinzas volantes da combustão do carvão, escórias do alto forno e agregados reciclados de betão) e compararam com o desempenho ambiental de um betão tradicional de referência. No caso das cinzas volantes, estas substituíram parcialmente o ligante, enquanto os restantes resíduos (areias de fundição, escórias de alto forno e agregados reciclados) substituíram parcialmente os agregados. Além da substituição isolada dos resíduos, os agregados reciclados de betão foram também adicionados às misturas com cinzas volantes, areias de fundição e escória do alto forno. A unidade funcional do estudo foi 1m³ de betão da classe C25/30 XC3. Ao nível das categorias de impacto ambiental, consideraram o aquecimento global, a acidificação, a depleção de recursos abióticos de combustíveis fósseis, a eutrofização e a criação fotoquímica de ozono. Por fim, a interpretação dos resultados mostrou que a produção de betões com cinzas volantes, areias de fundição, escórias de alto forno e agregados reciclados reduziam os

impactos ambientais nas categorias acima referidas em cerca de 75%, 85%, 65 a 85% e 88%, respetivamente.

(Chowdhury *et al.*, 2010) estudaram os impactos ambientais resultantes da aplicação de agregados alternativos (cinzas volantes e cinzas de fundo, resultantes da queima do carvão e, ainda, agregados reciclados de pavimentos em betão) na construção rodoviária e compararam com o desempenho ambiental de agregados naturais. A unidade funcional do estudo foi 1500m³ de agregados para uma secção do pavimento com 1000 m de comprimento, 2,5 m de largura e 0,60 m de espessura. Ao nível das categorias de impacte ambiental, analisaram o consumo de energia, a acidificação, o aquecimento global, a toxicidade humana, a ecotoxicidade aquática, terrestre e sedimentar aquática. Resumidamente, os resultados mostraram que não existe uma redução acentuada de impactos, mas que as cinzas volantes e de fundo conseguem reduzir as emissões nas categorias do aquecimento global e acidificação. Porém, este benefício está limitado pela distância de transporte dos resíduos comparativamente ao agregado natural, sendo a razão de transporte de 1/3 (agregado natural/resíduo).

(da Costa *et al.*, 2019) avaliaram os impactos ambientais de várias soluções de valorização de resíduos em materiais de construção e compararam com a solução atual (deposição em aterro). Os resíduos (cinzas volantes e de fundo) provinham da queima da biomassa em caldeiras de leito fluidizado e de grelha vibratória. Nos cenários alternativos, as cinzas volantes substituíram parcialmente o cimento na produção de argamassas de reboco, argamassas adesivas e em blocos. Relativamente às cinzas de fundo, elas substituíram parcialmente a areia na produção de argamassas correntes e argamassas adesivas, para além de serem usadas para substituírem a brita na produção de blocos e de misturas betuminosas. A unidade funcional da avaliação foi 1 ton de resíduo para cada solução de valorização e avaliaram as emissões nas categorias relativas ao aquecimento global, partículas em suspensão, criação fotoquímica de ozono, depleção de recursos minerais e fósseis, eutrofização da água doce, acidificação, ecotoxicidade da água doce e toxicidade humana cancerígena e não cancerígena. Na categoria do aquecimento global, a produção de argamassas com cinzas volantes (da caldeira de grelha vibratória), e de argamassas e de blocos com cinzas volantes (da caldeira de leito fluidizado) evita cerca de 850 e 857 Kg/CO₂-eq/t, respetivamente. Enquanto, a valorização das cinzas de fundo (leito fluidizado) nas argamassas correntes, argamassas adesivas, blocos de betão e misturas

betuminosas impede a emissão de 43 Kg/CO₂-eq/t. Além disso, a incorporação das cinzas de fundo (grelha vibratória) nas misturas betuminosas evita 14 Kg/CO₂-eq/t.

(Teixeira *et al.*, 2019) analisaram o desempenho técnico e ambiental da valorização das cinzas volantes resultantes da queima da biomassa (CVB) e do carvão (CVC) na produção de argamassas. Ao nível técnico, determinaram a trabalhabilidade, a densidade, o volume de vazios, a resistência à compressão e à flexão (a 7, 28, 56, 90 e 180 dias de cura), a absorção à água e a resistência à carbonatação em 18 formulações. A unidade funcional da avaliação foi 1m³ de argamassa e avaliaram as emissões nas categorias relativas ao aquecimento global, depleção da camada do ozono, acidificação, eutrofização, formação potencial de ozono na troposfera e depleção abiótica de combustíveis fósseis. No final, os resultados da avaliação ambiental mostraram que as emissões das formulações com cinzas volantes da queima do carvão e da biomassa são mais baixas do que as da argamassa de referência e as formulações com (49,5% de CVC+0,5 CVB), (48,8% de CVC+1,3 CVB) e com (45,5% de CVC+5 CVB) tiveram o melhor desempenho ambiental.

(Estanqueiro *et al.*, 2018) realizaram uma avaliação de ciclo de vida comparativa entre agregados naturais e reciclados na produção de betão. A unidade funcional dos cenários foi 1t de agregados naturais para ser usado na produção de betão. No cenário dos agregados naturais, consideraram as fases da extração e de processamento de agregados, transporte até à central de betão e transporte até ao local da obra. No cenário dos agregados reciclados incluíram as etapas do transporte entre o local de demolição e a central fixa de reciclagem, o processamento de agregados, o transporte entre a central de reciclagem e a central de betão, bem como o transporte entre a fábrica de produção de betão e o local de construção. Além disso, avaliaram o cenário anterior com uma central móvel e o transporte entre o local da demolição e centro de reciclagem foi eliminado, mas adicionaram na análise o transporte da central móvel. Os cenários foram avaliados nas categorias de aquecimento global, acidificação, eutrofização, destruição do ozono, formação de oxidantes, energia renovável e não renovável e mostraram que os cenários com os agregados reciclados produziram sempre menores impactos do que a solução dos agregados naturais.

Capítulo 5

Valorização de resíduos da indústria de pasta e papel em materiais de construção à escala industrial

5. Valorização de resíduos da indústria de pasta e papel em materiais de construção à escala industrial

Os agregados naturais, utilizados em grande quantidade em vários sectores da construção, são um recurso não renovável e a sua exploração em grande escala levará à sua escassez, para além de outros impactes envolvidos com a extração e transformação como o consumo elevado de energia, cada vez com mais peso nas operações industriais. Às elevadas emissões e outros impactos ambientais que produz, soma-se o facto da dificuldade crescente e de limitações na sua deposição final pois os aterros começam a estar saturados com resíduos e a legislação atual encara-os como última solução possível. Como os resíduos podem ter o potencial de serem usados como matérias-primas alternativas aos recursos naturais, uma possível estratégia para reduzir o impacto ambiental da exploração de agregados naturais, passaria pelo uso de resíduos e subprodutos de diferentes origens que tivessem o mesmo desempenho das matérias-primas naturais (Martinho *et al.*, 2018).

Atualmente, os agregados extraídos no mercado europeu e usados na construção são aplicados em: betão pronto (25%), betão pré-fabricado (15%), produtos asfálticos (10%), materiais não ligados (40%), enrocamentos (3%), balastro da via-férrea (2%) e produtos de betão arquitetónico (5%). O segmento das infraestruturas, dos edifícios comerciais, residenciais e sociais, e das estradas, das pistas e das hidrovias usam 15, 20, 25, 20 e 25% dos agregados, respetivamente (UEPG, 2020).

Típico de um modelo económico linear, atualmente em vigor ainda em muitos processos, resíduos sólidos como os produzidos pela indústria de pasta e papel, de que são um exemplo o caso dos resíduos inorgânicos como os *dregs*, *grits* e lamas ou cinzas de cal, são na grande maioria depositados em aterros adjacentes às unidades produtivas, levando à inexistência de soluções de valorização à escala industrial ou real para este fluxo de resíduos (Quina e Pinheiro, 2020; Rise Processum, 2017)

O projeto europeu, suportado pelo programa H2020 (2017-2021), denominado *Paperchain – “New Niche Markets for the Pulp and Paper Industry Waste based on circular economy approaches”*, onde o trabalho que suportou esta tese se enquadrou, esteve focado no desenvolvimento de novos modelos ou casos de economia circular, onde os resíduos da Indústria de pasta e papel foram utilizados como matérias-primas alternativas pelo setor da construção, químico e mineiro, para se poderem constituir como 5 casos de demonstração

européus de circularidade à escala real (Cepriá *et al.*, 2017). Um destes casos circulares está localizado e foi desenvolvido em Portugal, na região de Aveiro, e ligaram em dois pilotos (CC1A e CC1B) o sector industrial de pasta e papel com o sector da construção, nomeadamente, com os subsectores do betão pré-fabricado e dos pavimentos rodoviários. A Tabela 27 mostra os resíduos da indústria de pasta e papel usados nestes casos piloto europeus, incluindo os dois situados em Portugal que esta tese foca, bem como as possíveis soluções de valorização estudadas à escala industrial.

Tabela 27. Soluções de valorização de alguns resíduos da indústria de pasta e papel em materiais de construção à escala industrial no projeto *Paperchain* (Cepriá *et al.*, 2017).

| Resíduo | Destino atual | <i>Paperchain</i> (solução de valorização) | Local de aplicação |
|---|---|--|--------------------|
| <i>Green liquor dregs</i> | Depositado em aterro (95%) | Agregados para pavimentos rodoviários | Portugal |
| Lama de cal | Queimado no forno de cal e depositado em aterro | Filler para betão pré-fabricado | |
| <i>Slaker grits</i> | Depositado em aterro (90%) | Agregados para pavimentos rodoviários | Eslovénia |
| Lamas de destintagem provenientes da reciclagem de papel | Depositado em aterro (40%) e 35% para combustível | Estabilização de taludes | |
| Cinzas resultantes da valorização energética de rejeitos de papel | Depositado em aterro (100%) | Ligantes hidráulicos para pavimentos rodoviários | Espanha |

Ao nível produtivo, as unidades industriais de pasta e papel geram grandes quantidades de resíduos como os *dregs*, *grits* e lamas de cal, cuja geração depende da tecnologia utilizada bem como das condições operacionais de cada fábrica (Ferreira *et al.*, 2019; Quina e Pinheiro, 2020), como se pode ver na Tabela 28.

A maioria das investigações desenvolvidas com resíduos da indústria de pasta e papel têm sido desenvolvidas e estudadas à escala laboratorial, no entanto, existem alguns trabalhos que passaram para a dimensão da escala industrial, como, por exemplo, a utilização de *dregs* e *grits* na produção de clínquer (Castro *et al.*, 2009), ou o uso de misturas de *dregs* (70%) com *grits* (30%) ou de lamas de cal na produção duma camada intermédia de aterros de resíduos de sólidos urbanos (Farage *et al.*, 2019). O mesmo sucedeu com a utilização de *dregs* (2%) e de *grits* (5%) na produção industrial de agregados leves de argila expandida

(Vilarinho *et al.*, 2009) ou com a incorporação de *dregs* (2%) na fabricação de tijolos cerâmicos (Vilarinho, 2019).

Tabela 28. Quantidade de *dregs*, *grits* e lama de cal gerada na produção de 1 ton de pasta (kg/ton em base seca).

| Resíduo | Informação de produtor (Quina e Pinheiro, 2020) | Informação de produtor (Modolo, 2014) | Fabricas de pasta do tipo <i>Kraft</i> (Suhr <i>et al.</i> , 2015) |
|---------------------|---|---|---|
| <i>Dregs</i> | 12 | 12 | 10-20 ^(a) |
| Lama de cal | 25 | 15 | 10-20 |
| Slaker <i>grits</i> | 10 | 7 | - |

(a) Incluindo *dregs* e *grits*

No sentido de se transformar o modelo linear em circular através do aproveitamento dos resíduos gerados na indústria da celulose é aconselhável encontrar uma indústria que seja uma grande consumidora de recursos, de modo a promover o melhor escoamento de resíduos como matérias primas alternativas entre indústrias, num processo de simbiose industrial, que terá de ter em consideração, entre diversos fatores, a distância entre o gerador do resíduo e a indústria que o irá incorporar.

Neste capítulo 5 procura-se descrever e discutir os dois casos piloto circulares desenvolvidos, desde a escala laboratorial até à escala real ou industrial, e que procuraram avaliar em primeiro lugar a viabilidade técnica e operacional das soluções propostas ao nível de produtos de betão pré-fabricado e das misturas betuminosas para pavimentos rodoviários.

5.1. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários

As atividades de construção e de manutenção dos pavimentos rodoviários contribuem para uma pegada ecológica elevada do setor rodoviário e do setor da construção. Em Portugal e noutros países, a maioria dos pavimentos são classificados como flexíveis e estes são formados por várias camadas, incluindo as de misturas betuminosas. As formulações contêm diferentes frações de agregados e de betume como ligante, que representam aproximadamente 95% e 5% do peso da mistura betuminosa, respetivamente. No caso dos agregados, estes resultam da britagem da rocha que é extraída das pedreiras, enquanto o

betume é um subproduto da indústria petrolífera pois provém de processos de refinação do petróleo (Martinho *et al.*, 2018).

Na Figura 16 mostra-se a produção total de misturas betuminosas a quente e semi-quente na União Europeia, durante o período de 2009-2019. Em 2019, a indústria portuguesa produziu cerca de 3 milhões de toneladas de misturas betuminosas a quente, das quais 63% foram aplicadas em camadas de desgaste e estas receberam cerca de 92% de betão betuminoso (EN 13108-1). Ou seja, estes valores traduzem uma área de aplicação da camada de desgaste que ronda os 14,6 milhões de m² (EAPA, 2019).

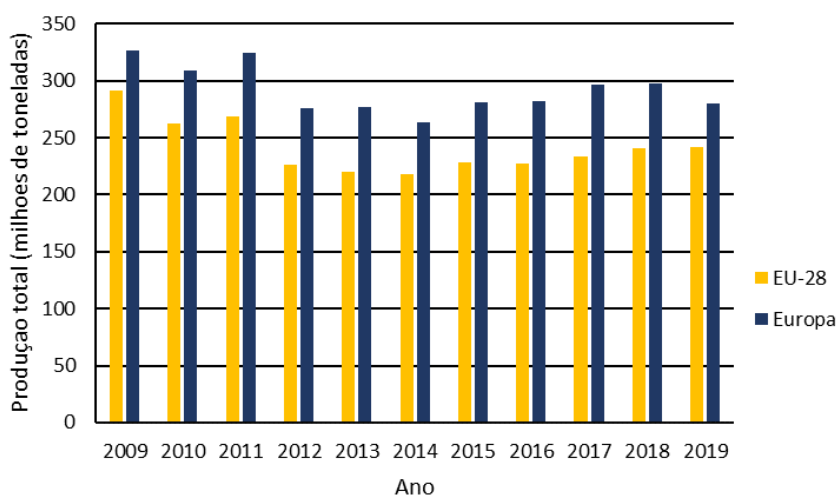


Figura 16. Produção total de misturas betuminosas a quente e semi-quente na União Europeia (EAPA, 2019).

Considerando o peso dos agregados na produção de misturas betuminosas (aproximadamente 95%), percebe-se de imediato que o setor consome grandes quantidades de agregados e, nesse sentido, é preciso encontrar novas soluções que diminuam o impacto do consumo de agregados naturais nas misturas betuminosas, bem como, a deposição de resíduos em aterro próprio e de outras indústrias, nomeadamente, da indústria de pasta e papel.

5.1.1. Descrição do caso de estudo

Este primeiro caso piloto diz assim respeito à valorização de resíduos (*dregs* e *grits*) como agregados em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários. Atualmente os modelos de negócio das misturas betuminosas e da indústria de pasta e papel (PPI) assentam

num modelo de produção linear (“recursos” – “produção” – “consumo” – “resíduos”), como se pode ver pela Figura 17.

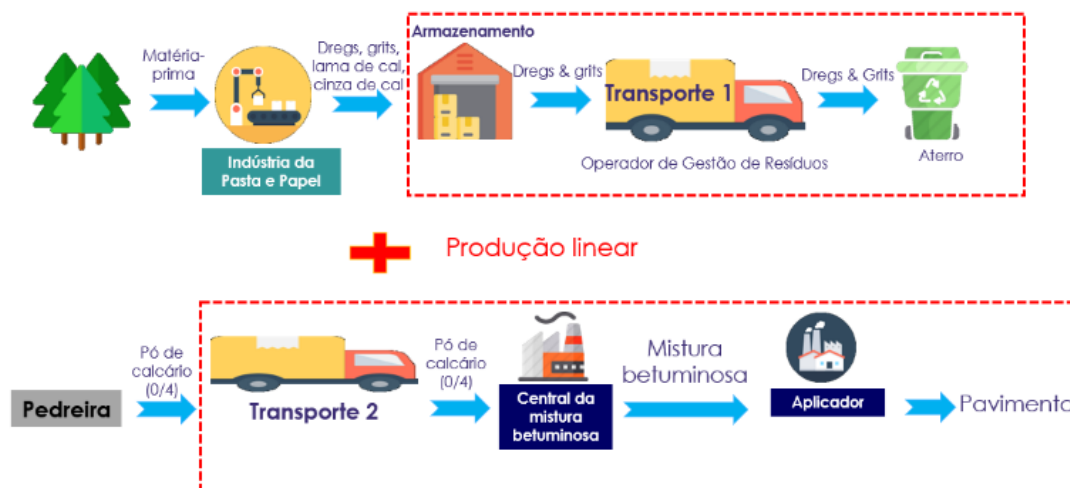


Figura 17. Modelo de produção linear do setor de pasta e papel e dos pavimentos rodoviários.

Em termos de processo das misturas betuminosas a quente, as matérias-primas (agregados e betume) são extraídos de recursos não renováveis que, depois, são transportados dos locais de extração e transformação (pedreiras e refinarias, respetivamente) até ao local de produção (central de betuminoso). Aí a produção da mistura (Figura 18) começa com o carregamento e deposição dos agregados grossos e finos na unidade de alimentação da central. Estes são, depois, secos num tambor-secador. Nesta fase, poderá existir a recuperação das partículas mais finas do filler, através de um sistema de despoeiramento. Após a secagem, os agregados são divididos por frações granulométricas e armazenados. No misturador, os agregados e o betume são doseados e misturados. De seguida, a mistura betuminosa é descarregada num camião basculante para depois ser transportada até ao local de aplicação, para construir ou reabilitar pavimentos rodoviários. Nesta última fase, a mistura é descarregada lentamente numa pavimentadora que espalha a mistura betuminosa. Logo a seguir, compacta-se a mistura betuminosa, através da passagem de um cilindro de rolos e pneus (APORBET, 1998; Branco *et al.*, 2016; EPA, 2000; Martinho *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2015; Saraiva, 2009).

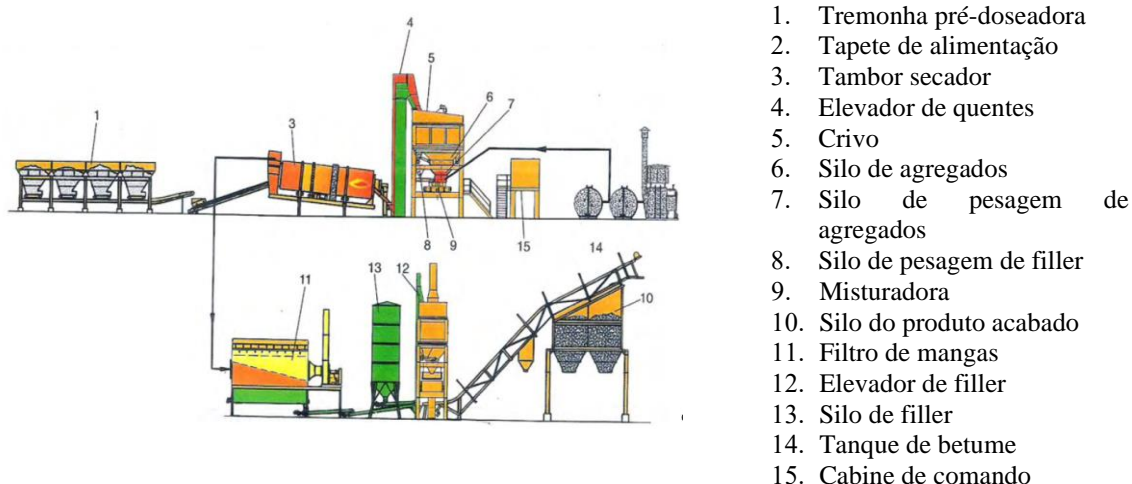


Figura 18. Esquema de uma central da mistura betuminosa (Saraiva, 2009).

Por outro lado, o processo da produção de pasta e papel, de tipo ou método kraft, começa pela extração da madeira na floresta e pelo transporte da mesma até à unidade fabril. Depois, na fábrica, os toros são descascados e destrocados, onde são produzidas as cascas e as aparas (pequenos pedaços de dimensão controlada). As aparas são usadas na etapa de impregnação e cozadura, enquanto as cascas são encaminhadas para a caldeira auxiliar de biomassa para produção de energia para o processo fabril. Durante a etapa de impregnação, as aparas de madeira são embebidas por o que se denomina como “licor branco”, que é formado essencialmente por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfureto de sódio (Na₂S). De seguida, as aparas são transferidas para um digestor contínuo, onde decorre o processo de cozimento que origina uma mistura de pasta crua, de material incozido e de um licor negro. Posteriormente, ocorre então a etapa de lavagem e de crivagem da pasta crua, do qual se obtém o “licor negro” e a separação dos incozidos da pasta crua adensada na lavagem, enquanto que pela crivagem, se consegue a remoção dos incozidos e dos aglomerados de fibras ou impurezas. Por fim, a pasta crua tem uma etapa de branqueamento, de modo a remover a lenhina residual e obter-se a pasta de papel branqueada, que é transformada em produto acabado (fardos) (Buruberri, 2014; Cunha, 2020; Marques, 2016, 2015; Matias, 2012; Modolo, 2014; Pinto, 2005). Na Figura 19 mostra-se um esquema resumido da fabricação da produção de pasta e papel por este método Kraft.

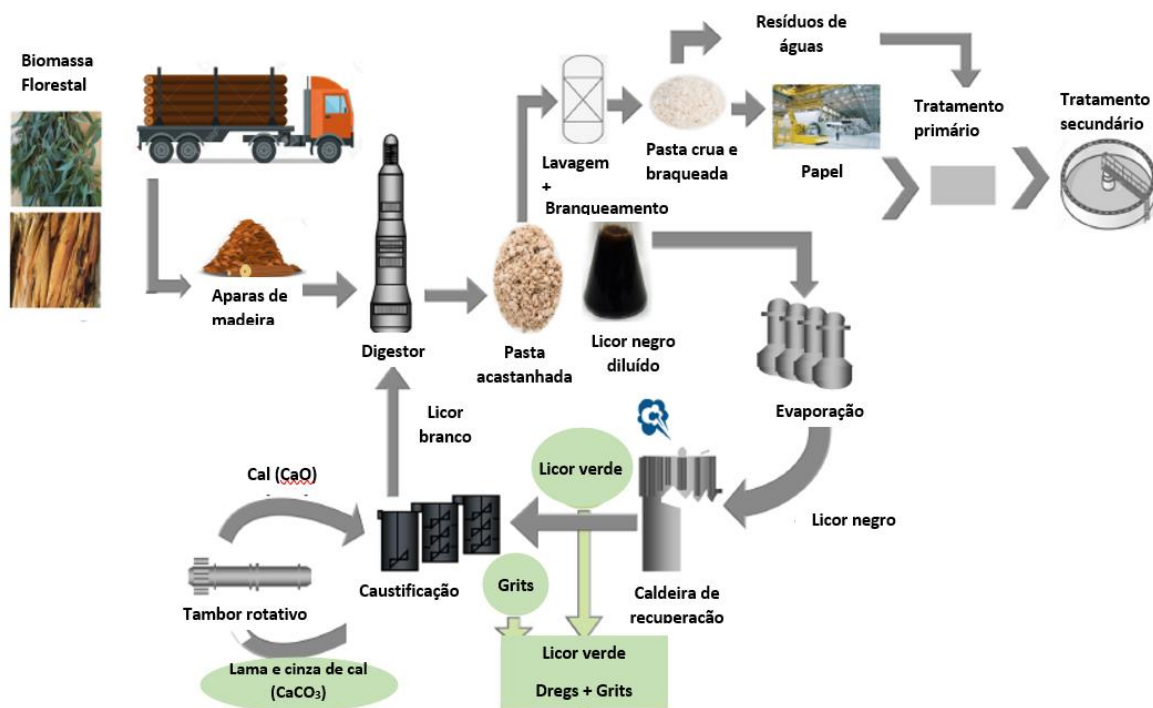


Figura 19. Esquema do processo de uma unidade de fabril da pasta de papel pelo método kraft e resíduos gerados (Cunha, 2020).

Após a lavagem, o liquor negro entra no circuito de recuperação de produtos químicos (Figura 20), onde passa por um processo de transformação em liquor branco, de modo a poder ser reutilizado na etapa de cozimento das aparas. Primeiro, o liquor negro é sujeito a uma fase de combustão da matéria orgânica remanescente de onde resulta o liquor verde, que é primeiramente clarificado por remoção dos componentes inorgânicos por sedimentação, que são descarregados para o exterior, constituindo um resíduo (*dregs*) (Figura 21 a). Estes *dregs* têm atualmente como principal destino a deposição no aterro controlado de resíduos não perigosos da unidade fabril.

Após a remoção dos componentes inorgânicos (*dregs*), o mesmo liquor verde segue para a etapa de caustificação, onde lhe é adicionado cal viva. Durante este processo de hidratação da cal, ocorre a sua desintegração, promovendo a libertação de inertes/impurezas de cal (areias, calcário e outras escórias até 250 μm), designadas por *grits* (Figura 21 b), outro resíduo que têm igualmente como principal destino a deposição no aterro controlado de resíduos não perigosos da unidade fabril.

Quando ocorre a etapa da caustificação, ou seja, de recuperação química do liquor verde é gerado o liquor branco, que é reutilizado na alimentação do digestor e resulta também outro

resíduo, as lamas de cal (ou de carbonato de cálcio, uma vez que é o seu componente principal). A lama de cal ou de carbonato de cálcio, é também introduzida num forno tubular rotativo (forno de cal), para um processo de calcinação que produz a cal que é de novo reutilizada como matéria-prima no processo de conversão de licor verde em licor branco, fechando-se assim o ciclo de recuperação química na indústria de pasta e papel (Buruberri, 2014; Marques, 2015; Matias, 2012; Modolo, 2014; Quina e Pinheiro, 2020). As lamas de cal sobrantes não reutilizadas e as cinzas de cal resultantes do forno de cal constituem-se assim como resíduos desta indústria a valorizar como filler em produtos diversos, pois são principalmente constituídas por carbonato de cálcio, típica composição por exemplo dos filleres calcários naturais usados em argamassas e betões, entre outros materiais.

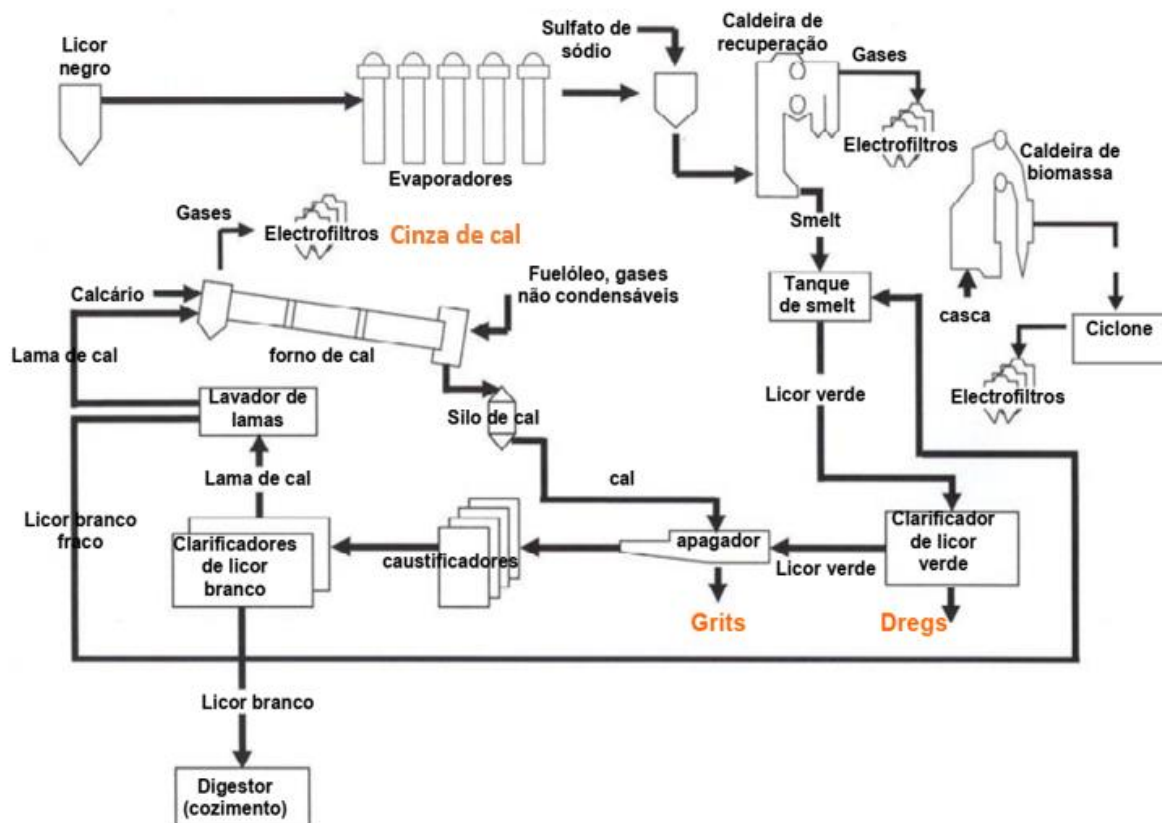


Figura 20. Esquema do processo de recuperação de químicos e energia (Pinto, 2005).

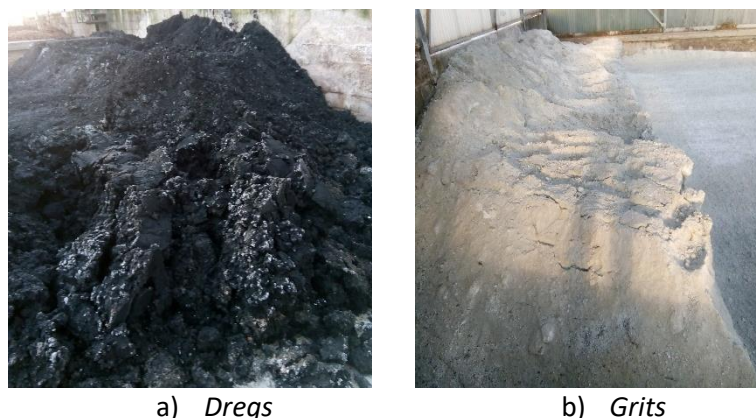


Figura 21. Amostras dos resíduos: a) *dregs* e b) *grits*.

Vários trabalhos de investigação têm caracterizado química e mineralogicamente os *dregs* e os *grits*, como se pode ver na Tabela 29 e Tabela 30. Estas caracterizações demonstraram que os resíduos têm alto teor de cálcio e que a calcite é o mineral principal que aparece nas diferentes caracterizações. Sabendo que as misturas betuminosas incorporam agregados naturais de origem calcária, de alto teor em carbonato de cálcio, a valorização dos resíduos passa por identificar sectores que utilizem matérias-primas com a composição idêntica aos resíduos de modo a valorizá-los. Neste sentido, (Modolo *et al.*, 2010) demonstraram o potencial da incorporação parcial dos *dregs* e dos *grits* em misturas betuminosas sem prejudicar o desempenho técnico. Esta substituição parcial foi feita nos agregados finos ou filleres e foi realizada à escala laboratorial.

Tabela 29. Identificação da composição química dos diferentes resíduos pela XRF.

| Parâmetro (%wt) | <i>Grits</i> | | <i>Dregs</i> | |
|--------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|--------------------------------------|
| | (Saeli <i>et al.</i> , 2019b) | (Luis de Oliveira Júnior <i>et al.</i> , 2019) | (Novais <i>et al.</i> , 2018) | (Martínez-Lage <i>et al.</i> , 2016) |
| SiO ₂ | 0,47 | 5,21 | 2,16 | 1,3 |
| CaO | 49,4 | 83,36 | 15,2 | 46,2 |
| Al ₂ O ₃ | 0,29 | 0,29 | 2,65 | 0,43 |
| K ₂ O | 0,27 | 0,5 | 0,89 | 0,28 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,05 | 1,16 | 0,68 | 0,8 |
| MgO | 0,45 | 0,66 | 8,13 | 3,3 |
| SO ₃ | 1,86 | 0,97 | 10,5 | 1,4 |
| Na ₂ O | 5,52 | 2,77 | 23,8 | 3,4 |
| P ₂ O ₅ | 0,38 | - | 0,39 | 3,3 |
| LOI | 41,1 | - | 34,3 | 38,5 |
| Outros | - | 5,08 | 1,3 | 1,06 |

Tabela 30. Identificação da composição mineralógica dos diferentes resíduos pela DRX.

| <i>Grits</i> | | <i>Dregs</i> | |
|--------------------------------|--|--|---|
| (Saeli <i>et al.</i> , 2019b) | (Luis de Oliveira Júnior <i>et al.</i> , 2019) | (Novais <i>et al.</i> , 2018) | (Martínez-Lage <i>et al.</i> , 2016) |
| Calcite – CaCO ₃ | Calcite – CaCO ₃ | Calcite – CaCO ₃ | Calcite – CaCO ₃ |
| Nahcolite – NaHCO ₃ | - | Pirssonite – Na ₂ Ca(CO ₃) ₂ *2(H ₂ O) | Dolomite – CaMg(CO ₃) ₂ |
| - | - | Óxido de magnésio MgO | Cesanite – Ca ₂ Na ₃ (SO ₄) ₃ (OH) |
| - | - | - | Thernadite - Na ₂ SO ₄ |

Após verificada a exequibilidade técnica da solução à escala laboratorial, o próximo passo envolve a análise da solução à escala industrial. Neste sentido, foi desenvolvido no contexto desta tese este caso piloto de estudo da valorização de resíduos (*dregs* e *grits*) em pavimentos rodoviários à escala industrial. O objetivo envolve também o criar uma simbiose industrial entre o setor da indústria de pasta e papel (PPI) e o setor das misturas betuminosas, de modo a promover um modelo de produção e de economia circular. Neste caso piloto específico, as empresas envolvidas estão próximas entre si (a menos de 50 km), o que é fundamental por causa do impacte dos transportes e, os resíduos serão usados como matéria-prima alternativa aos agregados finos naturais evitando-se, ao mesmo tempo, a deposição dos resíduos em aterro e o consumo de recursos naturais. Na Figura 22 mostra-se o esquema do modelo circular das misturas betuminosas com resíduos da indústria de pasta e papel (*dregs* e *grits*).

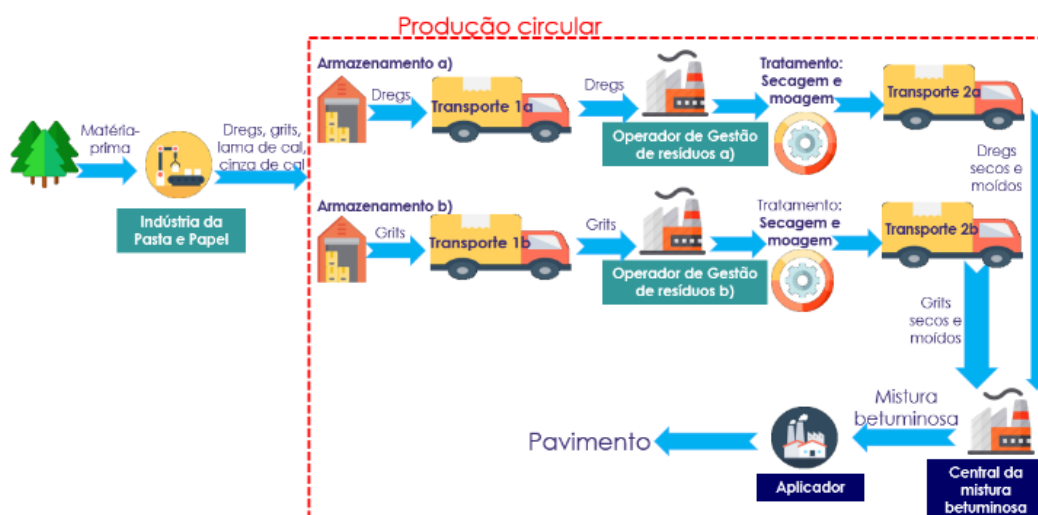


Figura 22. Modelo de produção circular dos *dregs* e dos *grits* nas misturas betuminosas.

Contudo, a transação entre a indústria de pasta e papel (PPI) e o recetor (misturas betuminosas) do novo modelo de produção circular (Figura 22) não pode ser direta, porque os resíduos têm uma humidade elevada para esta aplicação (20% e 50% para os *grits* e *dregs*, respetivamente). Por isso, é necessária uma secagem que deve ser garantida por um operador gestão de resíduos que efetue não só as operações devidamente licenciadas de transporte, mas também de pré-tratamento (secagem e peneiração), de modo a eliminar a humidade dos resíduos que prejudicaria a sua incorporação nas formulações das misturas betuminosas.

A maioria dos pavimentos rodoviários são do tipo flexível e são constituídos por várias camadas de misturas betuminosas, sendo este tipo de produto formado por agregados de dimensão variável (aproximadamente 95% em peso) e por betume (cerca de 5% em peso) enquanto ligante (Martinho *et al.*, 2018). Além disso, as diversas misturas betuminosas são hoje produtos normalizados e alvo da marcação CE, devido à existência de normas harmonizadas que definem os requisitos, características e os métodos de ensaio para este tipo de produtos. Por exemplo, as misturas betuminosas do tipo *asphalt concrete* são regulados pela norma de produto EN 13108-1, que define categorias para diferentes parâmetros a controlar (estabilidade, deformação e porosidade) (IPQ, 2006).

São vários os tipos de camada das misturas betuminosas (camadas de base, regularização, ligação e desgaste), bem como os tipos de misturas betuminosas (betão betuminoso, mistura betuminosa densa e macadame betuminoso) para se construir um pavimento rodoviário do tipo flexível (IP, 2014). Assim, o design das misturas betuminosas neste caso piloto centrou-se no betão betuminoso (tipo *AC 14 surface*) para realizar uma camada de desgaste superficial do pavimento rodoviário. Deste modo, os constituintes da mistura betuminosa do tipo *AC 14 Surface* na formulação de referência são uma brita granítica (6/14), um agregado fino (pó de granito e de calcário), um filler calcário comercial e um betume 50/70. Esta foi a formulação de partida neste caso piloto para incorporação dos resíduos (*dregs* ou *grits*) em substituição dos agregados naturais.

Na Figura 23 mostra-se o plano de deposição das misturas betuminosas (2800m² de área de pavimentação, num troço de estrada de 250 metros) neste caso de estudo que contempla a produção e aplicação de três misturas betuminosas (tipo *AC 14 surface*) com resíduos (*grits* ou *dregs*) e também a mistura betuminosa de referência (sem resíduo) para comparação.



Figura 23. Planta de implementação do caso de estudo (verde -referência, azul -*dregs* e rosa - *grits*).

Assim, este caso piloto de estudo envolveu o teste dos resíduos como matéria-prima alternativa ao agregado fino na produção de mistura betuminosa de modo a se criar uma alternativa à matéria-prima tradicional, mas sem alterar negativamente as condições de produção e as características finais da mistura betuminosa. Por isso, a quantidade de resíduo (*dregs* ou *grits*) usado neste trabalho para substituir o agregado fino foi pequena (cerca de 4%) mas intencional, no sentido de ser suficiente para avaliar o seu impacto, mas num contexto de se esgotar localmente os resíduos produzidos sem recorrer a transportes de longa distância (>50 km) que somariam impactes ambientais e económicos negativos.

Simultaneamente, preparou-se neste caso piloto um processo de licenciamento ambiental por envolver operações de valorização de resíduos, sobretudo para se poder avaliar o impacto da legislação em vigor como barreira à transição para um modelo circular mais sustentável. Assim, o código do processo de licenciamento na APA (Agência Portuguesa do Ambiente para este caso de estudo foi o PL20190405000563 traduzido num TUA emitido com o código TUA20190719000281 (Ferreira *et al.*, 2020).

5.1.2. Execução e monitorização do caso piloto

Previamente à execução do caso piloto, efetuou-se um licenciamento ambiental, seguindo as instruções do DL n° 178/2006 de 5 de setembro e DL n° 73//2011 de 17 de junho, porque envolvia operações de valorização de resíduos. De acordo com o DL n°73/2011, o

licenciamento ocorreu pela via do “processo simplificado” através da alínea f) do artigo 32 (DRE, 2011, 2006).

Atualmente este processo de licenciamento é submetido via online, através da plataforma SILIAMB, no qual os elementos instrutórios (nomeadamente, a localização e a quantidade de resíduos) do processo de licenciamento estão definidos no artigo 5 da portaria n.º 399/2015. No final, o processo de licenciamento emite um título único ambiental (TUA), no qual estão definidas as condições gerais e regras a que o caso de estudo deve obedecer (APA, 2021). Deste modo, definiu-se a utilização de 12 tons de resíduos (6 tons de *dregs* e 6 tons de *grits*) para usar nas formulações das misturas betuminosas com resíduos a aplicar no troço de estrada (Figura 23).

Após a obtenção da licença ambiental para se realizar o caso piloto, a implementação do caso de estudo requereu a colaboração direta do produtor de pasta e papel (The Navigator Company – Cacia, Aveiro), do operador licenciado de gestão do resíduo (Dilumex – Gestão de Resíduos LDA), do produtor e do aplicador (Megavia – Construções e Obras Públicas, S A.) da mistura betuminosa, entidades parceiras do projeto europeu *Paperchain*. Na Tabela 31 mostram-se as 17 etapas deste caso modelo circular, para se implementar o ensaio à escala industrial de pavimentação do trecho de estrada com 250 m de comprimento.

No caso da aplicação corrente da mistura betuminosa de referência, as oito primeiras etapas da Tabela 31 não são necessárias, uma vez que não há pré-tratamento aos resíduos, sendo as matérias-primas naturais transportadas diretamente da pedreira até à central das misturas betuminosas. Por isso, o transporte do pó de calcário circulou numa distância de 78 km, enquanto, o camião que transportou os resíduos, desde o produtor até ao aterro percorreu 1,5 km, na situação de referência sem incorporação de resíduos nas formulações (modelo linear).

A implementação do modelo circular (Tabela 31) requer um pré-tratamento (secagem e peneiração) dos resíduos no operador de gestão de resíduos. Por isso, a implementação começou com o transporte dos resíduos até ao operador de gestão de resíduos que está situado a 34 km do produtor dos resíduos (etapa nº1 da Tabela 31). De seguida, foram descarregados à entrada da estufa solar para serem espalhados ao longo do túnel de secagem (100 m) (etapa nº2 da Tabela 31). O aparelho de espalhamento desloca-se regularmente ao longo do túnel e o seu rolo dentado move-se no sentido oposto dos ponteiros de relógio, de modo a mover e espalhar os resíduos até ao fim da estufa em camadas finas. Após 4 semanas

e 6 semanas na estufa solar (etapa nº3 e 5 da Tabela 31), a humidade dos *grits* e dos *dregs* decresceu até 1,5% e 10%, respetivamente. Posteriormente, os *dregs* foram peneirados através do peneiro de 10mm, de modo a obter um material homogéneo utilizável nas formulações (etapa nº6 da Tabela 31). Este método de secagem solar permitiu não aumentar impactos causados por processos de secagem envolvendo fontes de energia não renováveis.

Após o pré-tratamento (secagem e peneiração), os resíduos foram transportados até à central das misturas betuminosas que está uma distância de 30 km do operador de gestão de resíduos (etapa nº7 da Tabela 31). O valor acumulado do transporte neste caso circular foi assim de 64 km comparativamente ao caso linear de transporte a 78 km, já referido atrás.

Após a receção dos resíduos na central de mistura, o processo de produção (etapa nº8 e 9 da Tabela 31) iniciou-se no caso circular com a mistura dos resíduos nos agregados naturais (brita e pó de calcário) na unidade de alimentação dos agregados a frio, ou então, só da mistura dos agregados naturais para a formulação de referência. O circuito dos agregados a frio não atravessa o tambor secador da central, por isso as únicas frações aquecidas foram a dos agregados naturais. De seguida, as várias frações da mistura betuminosa (brita, pó, filler, resíduos) foram misturadas com o betume no misturador e, posteriormente, foram descarregadas para o camião basculante (etapa nº10 da Tabela 31).

Durante a produção e transporte das misturas betuminosas, (etapa nº11 da Tabela 31), ocorreram trabalhos prévios no local de aplicação, nomeadamente, a fresagem do pavimento existente (etapa nº12 da Tabela 31), de modo a criar a rugosidade necessária, e a aplicação da emulsão betuminosa, para se aplicar a rega de colagem (etapa nº13 da Tabela 31).

Após a chegada das misturas betuminosas, iniciou-se o espalhamento das mesmas com a pavimentadora e, logo a seguir, aplicou-se o cilindro *tandem*, de modo a realizar a compactação da camada de desgaste do pavimento rodoviário (etapa nº14 da Tabela 31).

Ao longo do troço de cerca de 250 m desta estrada (etapa nº18), a camada de desgaste (tipo AC 14 *surface*) integrou o troço de referência (etapa nº17 da Tabela 31), o troço da mistura com *dregs* (etapa nº15 da Tabela 31) e o troço da mistura com *grits* (etapa nº16 da Tabela 31).

Tabela 31. Implementação das misturas betuminosas com e sem resíduos na camada de desgaste.

1. Transporte do resíduo do produtor até ao operador de gestão de resíduos, num camião basculante;



2. Processo de secagem na estufa solar;



3. Grits na estufa solar, durante a secagem;

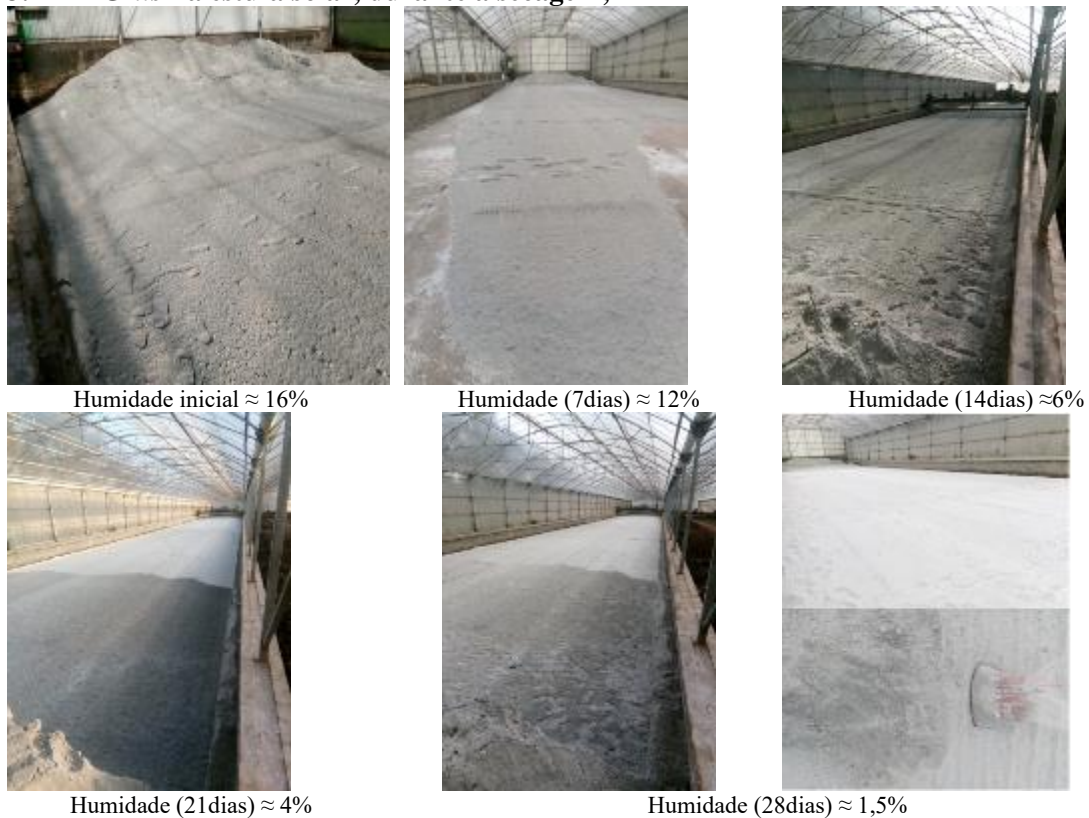


Tabela 31. (continuação) Implementação das misturas betuminosas na camada de desgaste.

4. Transporte dos *grits* do operador de gestão do resíduo até à central betuminosa;



5. Processo de secagem dos *dregs* na estufa solar;



Humidade inicial \approx 40%



Humidade (7dias) \approx 26%



Humidade (14dias) \approx 20%



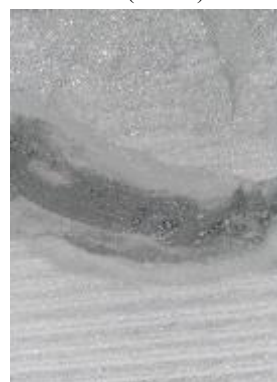
Humidade (21dias)



Humidade (28dias) \approx 16%



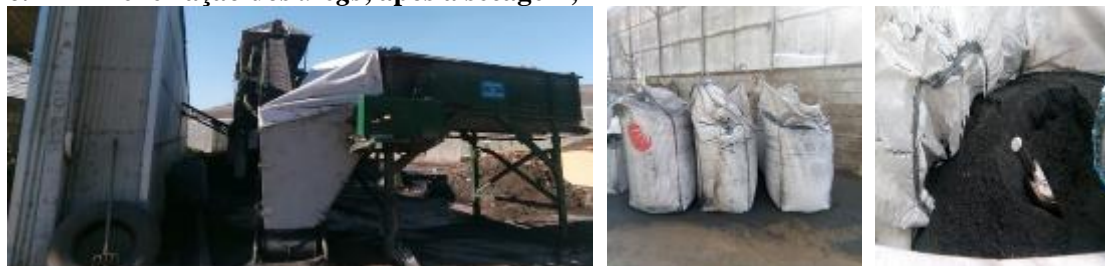
Humidade (35dias) \approx 12%



Humidade (42 dias) \approx 10%

Tabela 31. (continuação) Implementação das misturas betuminosas na camada de desgaste.

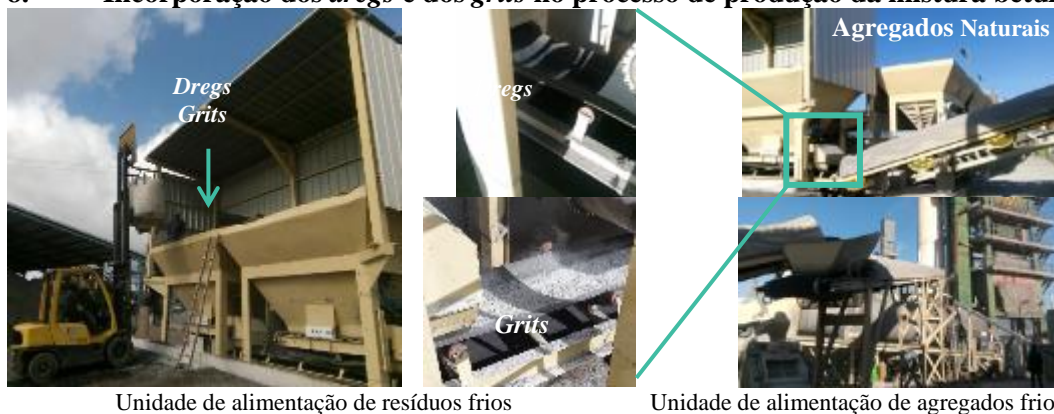
6. Peneiração dos *dregs*, após a secagem;



7. Transporte dos *dregs* do operador de gestão do resíduo até à central betuminosa;



8. Incorporação dos *dregs* e dos *grits* no processo de produção da mistura betuminosa;

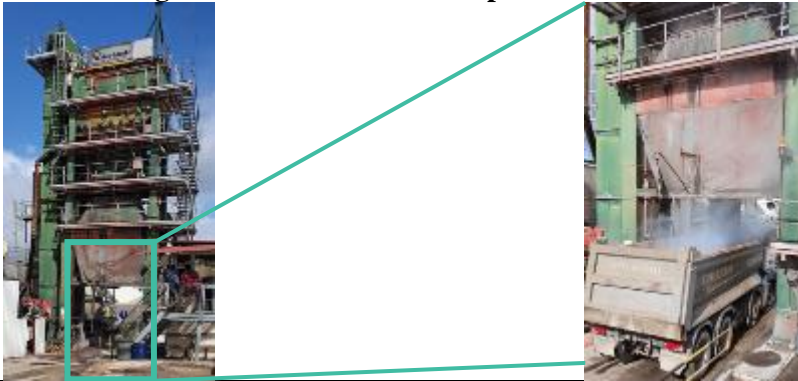


9. Produção da mistura betuminosa;



Tabela 31. (continuação) Implementação das misturas betuminosas na camada de desgaste.

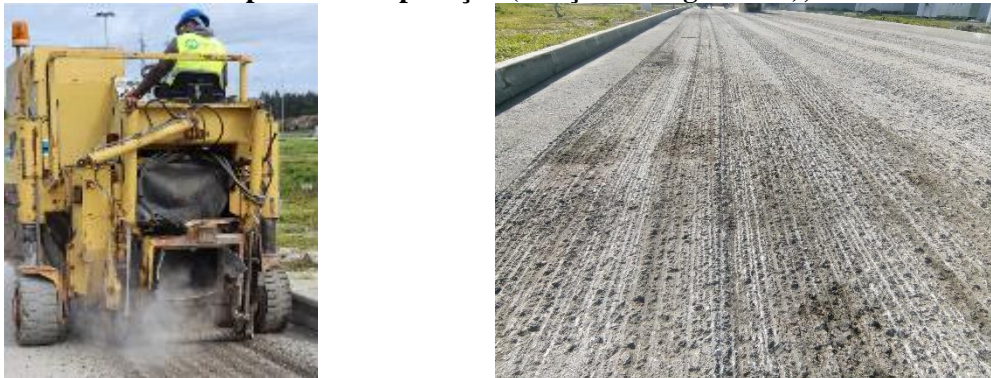
10. Descarga da mistura betuminosa para o camião basculante;



11. Transporte da mistura betuminosa até ao local de aplicação;



12. Pré-tratamento da superfície de aplicação (criação de rugosidade);



13. Aplicação da emulsão betuminosa;



Tabela 31. (continuação) Implementação das misturas betuminosas na camada de desgaste.

14. Aplicação da mistura betuminosa;



Trabalho de espalhamento através duma pavimentadora de rastros



Trabalhos de compactação através dum cilindro tandem

15. Mistura betuminosa com *dregs*;



16. Mistura betuminosa com *Grits*;



Tabela 31. (continuação) Implementação das misturas betuminosas na camada de desgaste.

17. Mistura betuminosa com agregados naturais (referência);



18. Resultado final



Dregs



Referência



Grits

Deste modo, os 2800m² de estrada foram divididos por três secções ou troços com as diferentes misturas para comparação (referência, *dregs* e *grits*) mostrando a Figura 24 parte do troço de 250 metros deste caso piloto já acabado de construir.



Figura 24. Troço da estrada pavimentada com e sem resíduos.

Antes da incorporação dos resíduos na central das misturas betuminosas, estes foram caracterizados, em laboratório, no sentido de avaliar as semelhanças ou diferenças entre eles

e o agregado natural (pó de calcário). Na Figura 25 mostra-se o aspecto visual do pó de calcário e dos dois resíduos em estudo (*dregs* e *grits*).

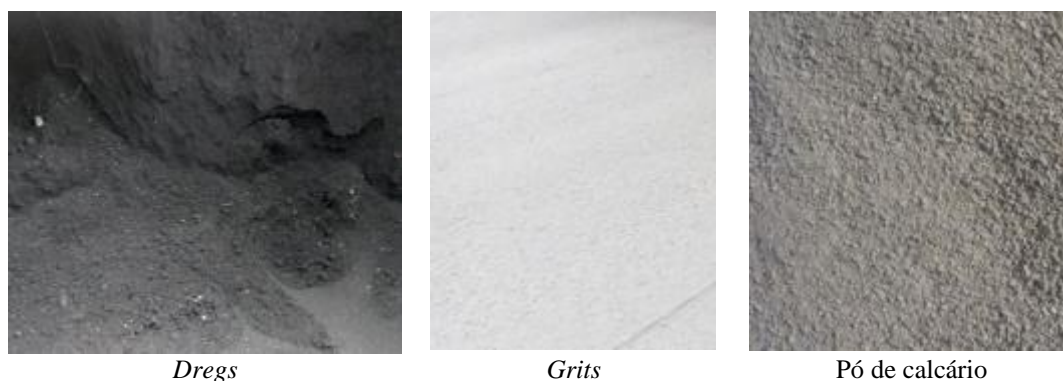


Figura 25. Aspecto visual entre os *dregs*, *grits* e pó de calcário.

Por outro lado, a marcação CE de produtos de construção é obrigatória para produtos que sejam abrangidos por uma norma harmonizada (Wall, 2021). Deste modo, os agregados para misturas betuminosas têm como referência a norma de produto EN 13043 e esta identifica quais os requisitos mínimos que os agregados devem cumprir (análise granulométrica) ou identifica um conjunto de propriedades que devem ser caracterizadas, nomeadamente a densidade e a qualidade dos finos (EP, 2014; Martinho *et al.*, 2018).

Após a secagem dos resíduos nas instalações do operador de gestão de resíduos, foram recolhidas amostras para avaliar a distribuição granulométrica final, bem como, a densidade das partículas e a qualidade dos finos. Na Figura 26 e Tabela 32 mostram-se os resultados da análise granulométrica e das propriedades avaliadas em laboratório, respetivamente.

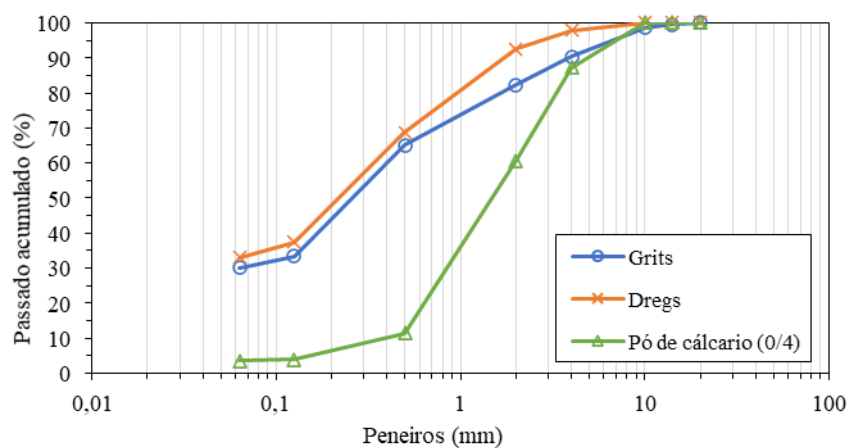


Figura 26. Distribuição de partícula dos *dregs*, *grits* e pó de calcário (0/4).

Os resultados da distribuição granulométrica dos resíduos (Figura 26) foram realizados de acordo com a norma de ensaio EN 933-2. A sua análise mostra que a distribuição de tamanhos dos resíduos é mais fina do que a do pó de calcário, mas as diferenças não são impeditivas para poderem ser utilizados na sua substituição.

Tabela 32. Resultados da caracterização dos *dregs*, *grits* e pó de calcário.

| Propriedade | Norma de ensaio | <i>Grits</i> | <i>Dregs</i> | Pó de calcário | Unidade |
|---------------------|-----------------|--------------|--------------|----------------|-------------------|
| Densidade | EN 1097-6 | 2,63 | 2,63 | 2,64 | Mg/m ³ |
| Qualidade dos finos | EN 933-9 | 0,2 | 3,6 | 4 | g/kg |

Os resultados dos *grits* e dos *dregs* (Tabela 32) são bastante semelhantes ao pó de calcário e cumprem o limite para a qualidade dos finos (medida pelo teste do azul de metileno) identificado no caderno de encargos tipo obra (CETO) das Infraestruturas de Portugal para o betão betuminoso (tipo AC 14 *surface*).

Para além dos resultados da caracterização do resíduo (análise granulométrica) foi ainda necessário avaliar o efeito da incorporação do resíduo na curva granulométrica da mistura de agregados, antes da produção das misturas betuminosas na central. Ou seja, foi necessário verificar se a formulação de referência, e as com *dregs* e com *grits* cumpriam o fuso granulométrico do betão betuminoso (AC 14 *surface*) para camada desgaste, imposto pelo CETO. Na Tabela 33 mostram-se as formulações elaboradas para o caso de estudo, onde os resíduos substituíram parcialmente (4%) o agregado pó de calcário da mistura betuminosa de referência. Contudo, o teor de betume utilizada na mistura betuminosa com *dregs* teve de ser ligeiramente superior à mistura betuminosa com filler natural ou com *grits*, de modo a manter a trabalhabilidade da mistura.

Tabela 33. Formulação das misturas betuminosas (AC 14 *surface*).

| Matérias-primas | Referência (%) | <i>Dregs</i> | <i>Grits</i> |
|--------------------------|----------------|--------------|--------------|
| Brita granítica (6/14mm) | 52 | 52 | 52 |
| Pó de granito (0/5mm) | 22 | 22 | 22 |
| Pó de calcário (0/4mm) | 22 | 18 | 18 |
| Filler comercial | 4 | 4 | 4 |
| <i>Dregs</i> | 0 | 4 | 0 |
| <i>Grits</i> | 0 | 0 | 4 |
| Betume | 4,9 | 5 | 4,9 |

Na Figura 27 apresenta-se a distribuição granulométrica das misturas de agregados com e sem resíduos, bem como, o fuso granulométrico do betão betuminoso (tipo AC 14 *surface*) para se realizar a camada de desgaste.

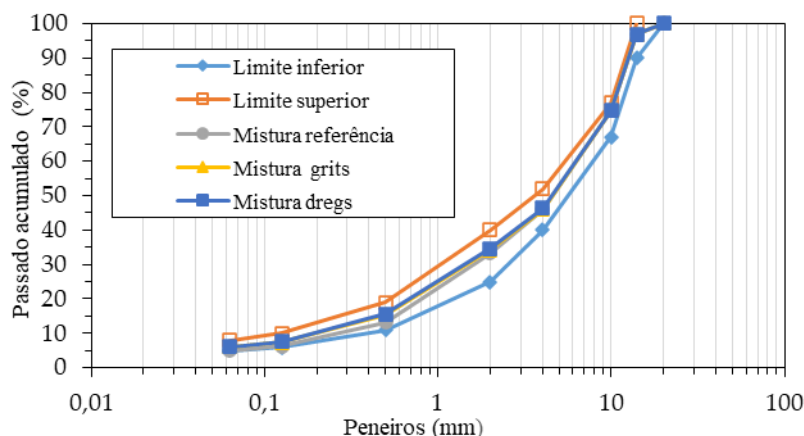


Figura 27. Curva granulométrica da mistura de agregados com e sem resíduos usada na produção das misturas betuminosas e o fuso granulométrico do AC 14 *surface* imposto pelo CETO da IP

Após a validação da mistura de agregados no fuso granulométrico (Figura 27), seguiu-se a produção e aplicação das diferentes misturas betuminosas nos respetivos troços da estrada do caso de estudo (Figura 23). Ao longo da implementação, a temperatura das misturas betuminosas foi verificada quer à saída da central quer à saída da pavimentadora. Na Figura 28 mostra-se a inspeção da temperatura nas misturas betuminosas, tendo a temperatura das misturas betuminosas com resíduos se mantido próxima à da mistura betuminosa de referência (170°C e 150°C, à saída da central e da pavimentadora, respetivamente).



Figura 28. Controlo da temperatura à saída da pavimentadora.

Simultaneamente ao registo da temperatura em obra foram recolhidas ainda amostras das três misturas betuminosas (referência, *dregs* e *grits*), de modo a se realizar um controlo de qualidade em laboratório. Este controlo foi realizado em dois períodos posteriores à implementação da camada de desgaste, 4 e 9 meses após a aplicação (em junho/julho de 2020) e novembro/dezembro de 2020).

Na Figura 29 apresentam-se as diferentes etapas do controlo de qualidade realizado em laboratório. Ou seja, a partir das amostras recolhidas em obra foram produzidos provetes para o ensaio de Marshall, com o intuito de verificar o cumprimento dos requisitos de uma mistura do tipo AC 14 *surface* (CETO-IP).



Figura 29. Controlo laboratorial sobre as misturas betuminosas.

Esta verificação envolveu um conjunto de ensaios que foram realizados após a produção dos provetes de Marshall, nomeadamente:

- Análise granulométrica – método de peneiração, de acordo com EN 933-1

- Percentagem em betume – método do refluxo, de acordo com ASTM D2172
- Baridade máxima teórica, de acordo com a EN 12697-5 (procedimento A)
- Baridade – de acordo com a EN 12697-6 (procedimento B)
- Características volumétricas (porosidade, vazios no esqueleto de agregados e vazios preenchidos com betume), de acordo com a EN 12697-8
- Características de Marshall (estabilidade, deformação e quociente de Marshall), de acordo com EN 12697-34
- Índice de resistência conservada, de acordo com MIL-STD-620^a (método 104)

Na Figura 30 e na Tabela 34 mostram-se os resultados dos parâmetros avaliados em julho de 2020. Os resultados das diferentes misturas betuminosas do primeiro momento de avaliação (Tabela 34) cumprem os limites impostos pelas especificações do caderno de encargos da IP, exceto um pequeno desvio na porosidade e na resistência conservada da mistura betuminosa com *dregs*. Em relação à mistura betuminosa com *dregs*, verifica-se que existe um decréscimo no volume de vazios preenchidos por betume (VFB) e um aumento na porosidade, ou seja, a mistura necessitaria de um maior teor de betume, de modo a corrigir a sua porosidade. Este excesso na porosidade advém dos *dregs* terem mais partículas finas (Figura 26) do que o pó de calcário e, conseqüentemente, o betume acaba por não ocupar todos os vazios da mistura como na de referência.

Tabela 34. Características das misturas betuminosas em julho/ agosto de 2020

| Amostra | Referência | Grits | Dregs | Limites CETO | Norma de Ensaio |
|-------------------------|------------|-------|-------|---------------------|--------------------------|
| Baridade | 2357 | 2351 | 2336 | - kg/m ³ | EN 12697-6 |
| Baridade Máxima Teórica | 2471 | 2465 | 2476 | - kg/m ³ | EN 12697-5 |
| Porosidade | 4,6 | 4,6 | 5,7 | 3 a 5 % | EN 12697-8 |
| VMA | 15.8 | 15.8 | 17.0 | ≥ 14 % | EN 12697-8 |
| VFB | 70,9 | 70,9 | 66,8 | - | EN 12697-8 |
| Deformação | 3,7 | 3,4 | 3,6 | 2 ≤ F ≤ 4 mm | EN 12697-34 |
| Estabilidade | 16,3 | 14,7 | 15,3 | 7,5 ≤ S ≤ 15 kN | EN 12697-34 |
| Quociente Marshall | 4,4 | 4,3 | 4,2 | ≥ 3 kN/mm | EN 12697-34 |
| IRC | 110 | 95 | 77 | 80 | MIL STD 620 (método 104) |
| %Betume | 4,9 | 4,9 | 4,9 | ±0,3 | Método do refluxo |

Além do ligeiro desvio na porosidade, a mistura betuminosa com *dregs* não atingiu pelo menos 80% da resistência conservada, embora tivesse ficado muito perto. Este incumprimento pode eventualmente condicionar a resistência da mistura betuminosa à ação da água e pode ser explicado pela presença de sais solúveis na composição dos *dregs* (Modolo *et al.*, 2010; Modolo, 2014). De modo a não realizar mais operações de pré-tratamento de resíduos, nomeadamente a lavagem dos *dregs*, optou-se por escolher um teor de incorporação (4%) que não compromettesse a viabilidade técnica da solução. Deste modo, encontrou-se também informação técnica e científica sobre a influência dos sais solúveis nas misturas betuminosas em que é indicado um limite de 4% para os sais solúveis nas misturas betuminosas (Chowdhury *et al.*, 2013; Shahin *et al.*, 2015).

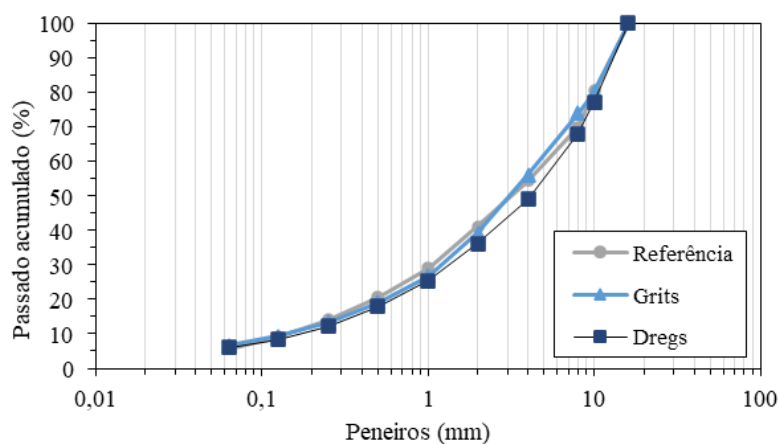


Figura 30. Resultados da análise granulométrica das misturas betuminosas em julho e agosto de 2020.

Na Tabela 35 e na Figura 31 exibem-se os resultados dos parâmetros avaliados na segunda monitorização (em novembro e dezembro de 2020). A repetição dos ensaios do controlo de qualidade nas misturas betuminosas demonstra o bom cumprimento dos limites do caderno de encargos da IP, com o tal pequeno desvio na porosidade e na resistência conservada da mistura com *dregs*. A porosidade desta mistura apresenta um ligeiro decréscimo devido à compactação da mistura, pois a baridade depende de vários fatores, nomeadamente da compactação, da curva granulométrica e da percentagem de betume. Estes dois últimos fatores mantiveram-se iguais nos dois momentos de controlo. Além disso, a baridade máxima teórica da mistura betuminosa é da mesma ordem de grandeza (Tabela 34 e Tabela 35), desde que não se altere o teor de betume e a curva granulométrica.

Consequentemente, a estabilidade no segundo controlo também aumentou, devido ao aumento da compactidade da mistura.

Tabela 35. Características das misturas betuminosas em novembro/dezembro de 2020.

| Amostra | Referência | Grits | Dregs | Limites CETO | Norma de Ensaio |
|-------------------------|------------|-------|-------|---------------------|--------------------------|
| Baridade | 2374 | 2380 | 2348 | - kg/m ³ | EN 12697-6 |
| Baridade Máxima Teórica | 2465 | 2483 | 2479 | - kg/m ³ | EN 12697-5 |
| Porosidade | 3,7 | 4,2 | 5,3 | 3 a 5 % | EN 12697-8 |
| VMA | 15,0 | 15,5 | 16,7 | ≥ 14 % | EN 12697-8 |
| VFB | 75,3 | 73,2 | 68,4 | - | EN 12697-8 |
| Deformação | 4,2 | 4,0 | 3,9 | 2 ≤ F ≤ 4 mm | EN 12697-34 |
| Estabilidade | 23,8 | 18,6 | 18,2 | 7,5 ≤ S ≤ 15 kN | EN 12697-34 |
| Quociente Marshall | 5,6 | 4,7 | 4,6 | ≥ 3 kN/mm | EN 12697-34 |
| IRC | 90 | 93 | 77 | 80 | MIL STD 620 (método 104) |
| %Betume | 5,2 | 5,1 | 4,7 | ±0,3 | Método do refluxo |

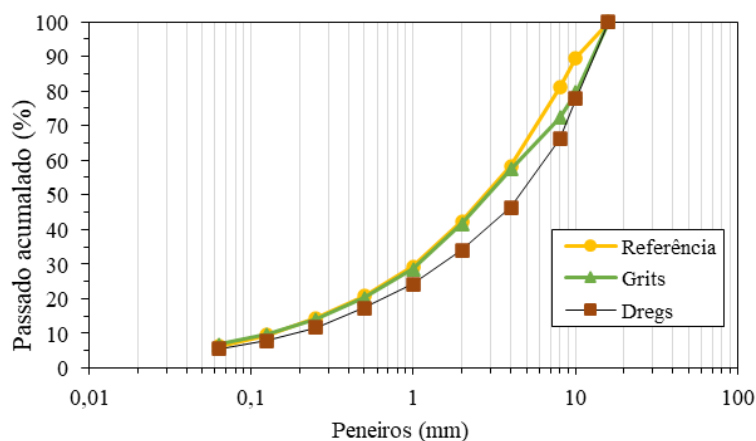


Figura 31. Resultados da análise granulométrica das misturas betuminosas em novembro e dezembro de 2020.

A incorporação parcial dos resíduos na mistura betuminosa não produz alterações significativas na curva granulométrica relativamente à mistura betuminosa de referência, como se observa na Figura 30 e Figura 31.

Além do controlo técnico em laboratório, o controlo ambiental das soluções desenvolvidas foi monitorizado, de modo a avaliar a sua perigosidade ambiental. A norma de produto das misturas betuminosas e dos agregados não tem nenhuma referência a parâmetros ambientais que devem ser analisados ou verificados. Deste modo, seguiu-se o procedimento, bem como, os valores limites para admissão em aterros para resíduos inertes

(DL nº 183/2009). Assim, avaliou-se a condutividade, pH, CQO, cloretos e metais pesados (cádmio, crómio, cobre, níquel, chumbo e zinco) das diferentes misturas betuminosas.

Na Figura 32 mostra-se os eluatos recolhidos das misturas betuminosas. Estes foram colocados a uma razão 1/10 e foram avaliados após 5, 24, 48, 72 e 96 h de mistura. As concentrações dos lixiviados (Tabela 36) das misturas betuminosas ficaram todas abaixo do limite de admissão para resíduos inertes. Deste modo, a incorporação dos resíduos nas misturas betuminosas não afeta o meio ambiente e a saúde humana. Quando aparece o símbolo de “menor que” (<) e a sigla “L.Q.”, quer dizer que o equipamento de leitura não conseguiu quantificar a presença desses elementos com maior precisão, por ser um valor inferior ao limite de quantificação desse parâmetro.

Tabela 36. Resultados dos lixiviados em laboratório.

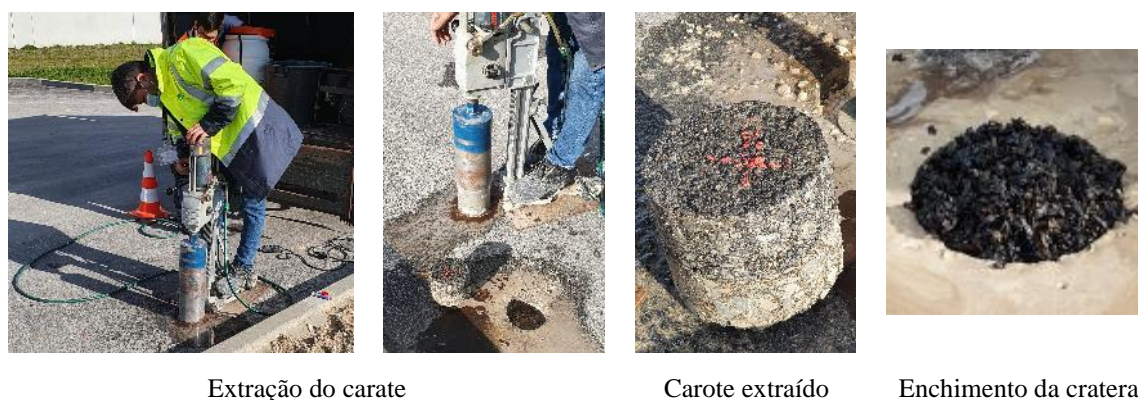
| Mistura betuminosa | Tempo de teste (h) | Cloretos (mg/L) | Metais (mg/L) | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|
| | | | Cádmio | Crómio Total | Cobre | Níquel | Chumbo | Zinco |
| <i>Grits</i> | 5 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 24 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | 0,0065 ± 0,0018 | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 48 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 72 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 96 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | 0,00123 ± 0,00034 | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| <i>Dregs</i> | 5 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 24 | 1,04 | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 48 | 1,26 | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | 0,0068 ± 0,0019 | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 72 | 1,36 | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | 0,0100 ± 0,0026 | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 96 | 1,28 | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| Referência | 5 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 24 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 48 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | 0,0080 ± 0,0022 | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | 0,0206 ± 0,0058 |
| | 72 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | 0,0065 ± 0,0018 | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| | 96 | < 1,00 (L.Q.) | < 0,0005 (L.Q.) | < 0,003 (L.Q.) | < 0,006 (L.Q.) | < 0,001 (L.Q.) | < 0,002 (L.Q.) | < 0,02 (L.Q.) |
| Limite DL 183/2009 (mg/L),* | - | 80 | 0,004 | 0,05 | 0,2 | 0,04 | 0,05 | 0,4 |

* com L/S =10l/kg para resíduo inerte.



Figura 32. Controlo ambiental realizado em laboratório.

Além da análise laboratorial, foi também realizado o controlo *in situ*. Nesta avaliação foram extraídos 3 carotes de 150 mm de diâmetro por cada secção da mistura betuminosa. A carotagem aconteceu em dois momentos diferentes (6 e 12 meses após a construção da camada de desgaste), de modo a se avaliar a porosidade, o teor de betume, a distribuição granulométrica das misturas, a densidade e a densidade máxima. Na Figura 33 mostra-se as etapas de extração de carotes para análise e em que a recolha foi feita ao longo da berma dos troços das misturas betuminosas. Enquanto, na Figura 34 exhibe-se a estrutura do pavimento rodoviário do caso de estudo.



Extração do carote

Carote extraído

Enchimento da cratera

Figura 33. Etapas da extração de carotes para análise.

Os dezoito carotes extraídos ao longo da recolha mostram as duas camadas de misturas betuminosas (Figura 34), onde a primeira camada de base da mistura betuminosa já tinha sido construída antes da aplicação da camada de desgaste propriamente dita do caso de estudo. Além disso, as camadas betuminosas não se desligaram ao longo da extração dos carotes, isto quer dizer que existe uma boa aderência entre as duas misturas betuminosas.

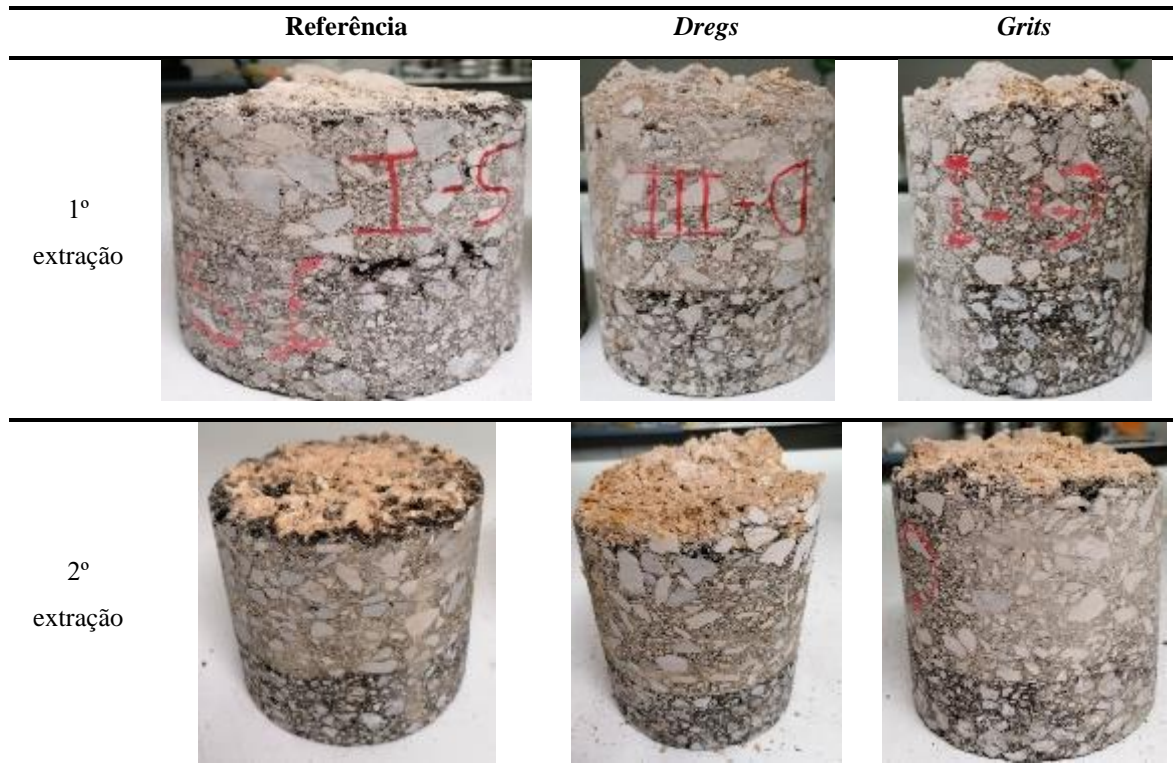


Figura 34. Estrutura do pavimento das camadas ligadas (carotes).

Na Figura 35 e na Tabela 37 mostram-se os resultados das curvas granulométricas e das características dos carotes da 1º extração, respetivamente. A incorporação dos resíduos (*dregs* e *grits*) nas misturas betuminosas não alterou significativamente os parâmetros obtidos relativamente à mistura betuminosa tradicional.

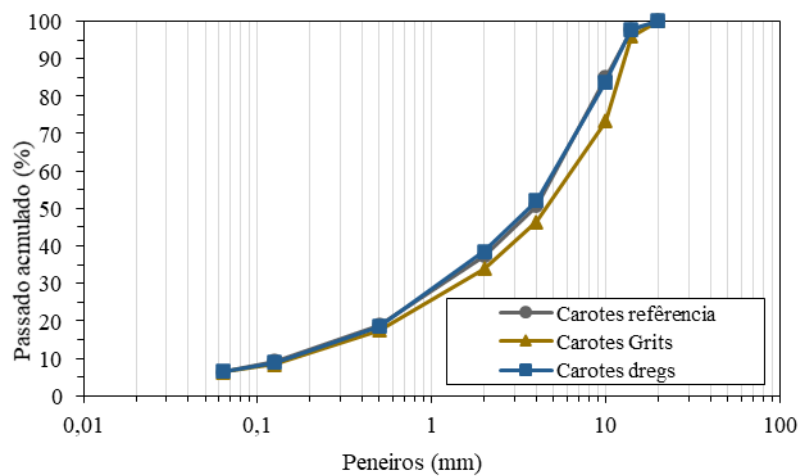


Figura 35. Resultados da distribuição granulométrica dos carotes retirados da 1º extração.

Tabela 37. Características das misturas betuminosas nos carotes da 1ª extração.

| Amostras | Referência | | | Grits | | | Dregs | | |
|--|------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Densidade máxima (kg/m ³) | 2422 | | | 2452 | | | 2409 | | |
| Densidade (kg/m ³) | 2215 | 2260 | 2247 | 2296 | 2273 | 2248 | 2275 | 2297 | 2294 |
| Conteúdo em ligante solúvel (%) | 4,6 | | | 4,5 | | | 4,6 | | |
| Espessura (mm) | 62 | 63 | 56 | 51 | 40 | 42 | 53 | 58 | 52 |
| Porosidade (VM) (%) | 8,5 | 6,7 | 7,2 | 6,3 | 7,3 | 8,3 | 5,6 | 4,6 | 4,8 |
| Teor de Volumétrico em betume (TVB) (%) | 9,9 | 10,1 | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,8 | 10,2 | 10,3 | 10,2 |
| Vazios no esqueleto de mineral (VMA) (%) | 18,4 | 16,8 | 17,2 | 16,4 | 17,2 | 18,2 | 15,7 | 14,9 | 15,0 |
| Grau de saturação em betume (GS) (%) | 53,7 | 60,2 | 58,2 | 61,3 | 57,6 | 54,1 | 64,7 | 68,8 | 68,3 |
| Grau de compactação “densidade máxima” | 91,5 | 93,3 | 92,8 | 93,7 | 92,7 | 91,7 | 94,4 | 95,4 | 95,2 |

Na Figura 36 e na Tabela 38 apresentam-se os resultados das curvas granulométricas e das características dos carotes da 2ª extração, respetivamente. Nesta segunda extração, a incorporação dos resíduos (*dregs* e *grits*) nas misturas betuminosas continua com a mesma ordem de grandeza nos parâmetros obtidos relativamente à mistura betuminosa tradicional.

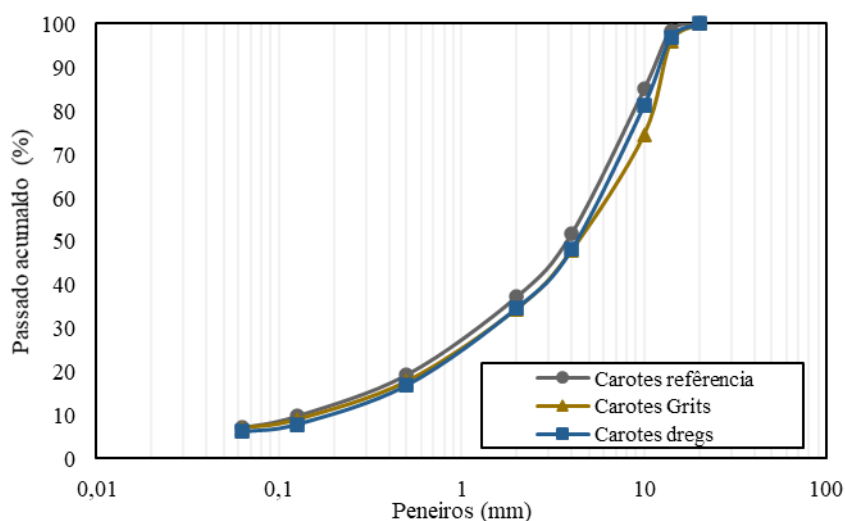


Figura 36. Resultados da distribuição granulométrica dos carotes retirados da 2ª extração.

Tabela 38. Características das misturas betuminosas nos carotes da 2º extração.

| Amostras | Referência | | | Grits | | | Dregs | | |
|--|------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Densidade máxima (kg/m ³) | 2504 | | | 2513 | | | 2522 | | |
| Densidade (kg/m ³) | 2275 | 2329 | 2219 | 2232 | 2232 | 2258 | 2286 | 2302 | 2247 |
| Conteúdo em ligante solúvel (%) | 4,6 | | | 4,4 | | | 4,4 | | |
| Espessura (mm) | 57 | 59 | 49 | 56 | 48 | 42 | 49 | 49 | 49 |
| Porosidade (VM) (%) | 9,2 | 7,0 | 11,4 | 9,0 | 8,4 | 10,6 | 11,5 | 11,5 | 10,5 |
| Teor de Volumétrico em betume (TVB) (%) | 10,2 | 10,4 | 9,9 | 9,8 | 9,8 | 9,6 | 9,5 | 9,5 | 9,6 |
| Vazios no esqueleto de mineral (VMA) (%) | 19,3 | 17,4 | 21,3 | 18,8 | 18,2 | 20,2 | 21,0 | 21,0 | 20,1 |
| Grau de saturação em betume (GS) (%) | 52,6 | 59,7 | 46,5 | 51,9 | 53,9 | 47,5 | 45,3 | 45,4 | 47,9 |
| Grau de compactação “densidade máxima” | 90,8 | 93,0 | 88,6 | 91,0 | 91,6 | 89,4 | 88,5 | 88,5 | 89,5 |

Além da extração de carotes, também foram realizadas inspeções visuais ao pavimento, após entrar em serviço. Estas análises ocorreram após 6 meses e 1 ano de serviço, de modo a identificar possíveis degradações que pudessem aparecer no pavimento flexível. Normalmente, podem aparecer degradações como o fendilhamento, o fendilhamento do tipo pele de crocodilo, peladas, desagregações superficiais, exsudação do betume, polimento dos agregados, assentamentos localizados, covas (ninhos), reparações, rodeiras, irregularidade longitudinal e aderência (Branco *et al.*, 2016).

Na Tabela 39 mostram-se as anomalias que foram identificadas durante as inspeções visuais realizadas. Em todas as secções apareceram pequenas rodeiras e desagregações superficiais sem grande significado. Além disso, na seção dos *grits* apareceu uma pequena fenda transversal, devido à transição do pavimento rígido de base para o superficial de tipo flexível. É de destacar que nesta zona de aplicação das 3 misturas betuminosas, passam, com grande frequência, caminhões pesados de mercadoria que pode ter gerado esta anomalia. No entanto, estas anomalias não são consideradas degradações significativas, considerando o tráfego diário pesado desta estrada situada numa parte da instalação industrial onde se descarregam e carregam mercadorias e matérias primas em caminhões pesados para a empresa.

Tabela 39. Anomalias identificadas durante a inspeção visual.








| Degradação | Referência | <i>Dregs</i> | <i>Grits</i> |
|----------------------------|--|---|--|
| Rodeira |  |  |  |
| Desagregações superficiais |  |  |  |
| Fenda transversal | |  | |

Tabela 40. Tabela definidora das degradações em pavimentos flexíveis (Benta *et al.*, 2008).

| Degradação | Nível de Gravidade | Descrição do nível de Gravidade | Área afetada/ valor adotado |
|---|--------------------|--|---|
| 1 Fendilhamento | Nível 1 | Fenda isolada | 0,5m x comp. Afetado |
| | Nível 2 | Fenda longitudinal significativa, ramificada com eventual perda de agregados (2mm < abertura < 4mm) | 2,0m x comp. Afetado |
| | Nível 3 | Fenda longitudinal grave ramificada ou em grelha ligeira com perda de material (abertura > 4 mm) Fenda transversal de qualquer gravidade | Largura do trecho x comp. Afetado |
| 2 Fendilhamento do tipo de pele de crocodilo | Nível 1 | Malha com fendilhamento de abertura de pequena dimensão e sem ascensão de finos (abertura < 2mm e malha > 20cm) | Largura do trecho x comp. Afetado |
| | Nível 2 | Malha com fendilhamento de abertura de qualquer dimensão e com perda de material (Fendas com abertura < 2mm e malha < 20cm, ou fendas com abertura entre 2 e 4mm para qualquer tipo de malha, ou fendas com abertura > 4mm e malha > 40cm) | Largura do trecho x comp. Afetado |
| | Nível 3 | Malha com fendilhamento de abertura de grande dimensão com perda de material e ascensão de finos (Fendas com abertura > 4mm e malha < 40cm) | Largura do trecho x comp. Afetado |
| 3 Peladas, Desagregações , superficiais, Exsudação do betume, Polimento dos agregados, Assentamentos localizados | Nível 1 | Anomalia com largura < 30cm | 0,5m x comp. Afetado |
| | Nível 2 | 30cm < Anomalia com largura < 100cm | 2,0m x comp. Afetado |
| | Nível 3 | Anomalia com largura > 100cm ou várias anomalias de qualquer largura na mesma secção transversal | Largura do trecho x comp. Afetado |
| 4 Covas (Ninhos) | Nível 1 | Profundidade máxima da cavidade < 2cm | 0,5m x comp. Afetado |
| | Nível 2 | 2cm < Profundidade máxima da cavidade < 4cm | 2,0m x comp. Afetado |
| | Nível 3 | Profundidade máxima da cavidade > 4cm ou várias covas de qualquer largura na mesma secção transversal | Largura do trecho x comp. Afetado |
| 5 Reparações | Nível 1 | Reparações bem executadas | ¼ da largura do trecho comp. Afetado |
| | Nível 2 | Reparações com baixa qualidade de execução ou má elaboração das juntas | ½ da largura do trecho x comp. Afetado |
| | Nível 3 | Reparações mal executadas | Largura do trecho x comp. Afetado |
| 6 Rodeiras | Nível 1 | Profundidade máxima da rodeira < 10mm | 10mm |
| | Nível 2 | 10mm < Profundidade máxima da rodeira < 30 mm | 25mm |
| | Nível 3 | Profundidade máxima da rodeira > 30mm | 40mm |
| 7 Irregularidade longitudinal | - | Valor do IRI | IRI (mm/km) |

Com base na inspeção visual, a qualidade superficial do pavimento foi depois calculada com base no índice de qualidade (IQ). Este índice tem uma expressão que relaciona os diferentes tipos de degradações (Benta *et al.*, 2008), a saber:

$$QI = -0.002139 \times R^2 - 0.03 \times (C + S + P)^{0.5} + 5 \times e^{(-0.0002598 \times IRI/2)}$$

onde:

- IRI – Irregularidade longitudinal do pavimento (*International Roughness Index* (mm/km))
- R – Profundidade média das rodeiras (mm)
- C – Área com fendilhamento e pele de crocodilo ($m^2/100m^2$)
- S – Área com degradação superficial de materiais (covas e peladas) crocodilo ($m^2/100m^2$)
- P – Área com reparações ($m^2/100m^2$).

O índice de qualidade pode variar entre 0, 2, 3,5 e 5, sendo o primeiro intervalo (0 a 2) classificado de mau, enquanto o segundo (de 2 a 3,5) é classificado de razoável e, por fim, o último intervalo (de 3,5 a 5) é considerado de bom (Benta *et al.*, 2008). Durante a inspeção visual, as patologias foram classificadas de acordo com a intensidade e extensão da degradação, como se pode ver na Tabela 40.

Na Tabela 41 mostra-se a metodologia para quantificar o valor de IRI, onde este valor foi calculado pela média ponderada dos diferentes níveis de degradação e da sua extensão.

Tabela 41. Metodologia para quantificar o valor do IRI (Benta *et al.*, 2008).

| Degradação | Condição | Nível | IRI |
|------------------------------------|-----------|-------|---------------------------|
| Fendilhamento Pele de crocodilo | \leq, e | 1 | Tipo 1 IRI= 1500 mm/km |
| Peladas, etc | \leq, e | 1 | |
| Rodeiras | \leq | 1 | |
| | | | Tipo 2 IRI= 2500 mm/km |
| Fendilhamento Pele de crocodilo | $=, ou$ | 3 | Tipo 1 IRI= 3500 mm/km |
| Peladas, etc | $=, e$ | 3 | |
| Rodeiras | \geq | 2 | |

Na Tabela 42 mostra-se o índice de qualidade superficial dos pavimentos e não existe nenhuma diferença entre as três diferentes secções (referência, *dregs* e *grits*). Todas as

secções mostram boa qualidade e também apresentam o mesmo tipo de degradações nas 3 diferentes misturas betuminosas.

Tabela 42. Índice de qualidade do caso de estudo, após um ano de serviço.

| Degradação | Referência | Dregs | Grits |
|------------|------------|-------|-------|
| C | 0 | 0 | 1 |
| S | 18 | 2 | 23 |
| P | 0 | 0 | 0 |
| IRI | 1500 | 1500 | 1500 |
| R | 1 | 3 | 0 |
| QI | 4,0 | 4,1 | 4 |
| Qualidade | Boa | Boa | Boa |

Além do controlo técnico *in situ*, também foi realizado uma campanha ambiental, de modo a avaliar a perigosidade ambiental das misturas betuminosas com resíduos. Esta avaliação foi realizada em termos de comportamento à lixiviação. A estrada tem um sistema de drenagem próprio com sumidouros de água que foi aproveitado nesta avaliação (Figura 37). Este sistema de águas pluviais, por sua vez, está ligado a uma vala natural de recolha final de águas naquela zona.

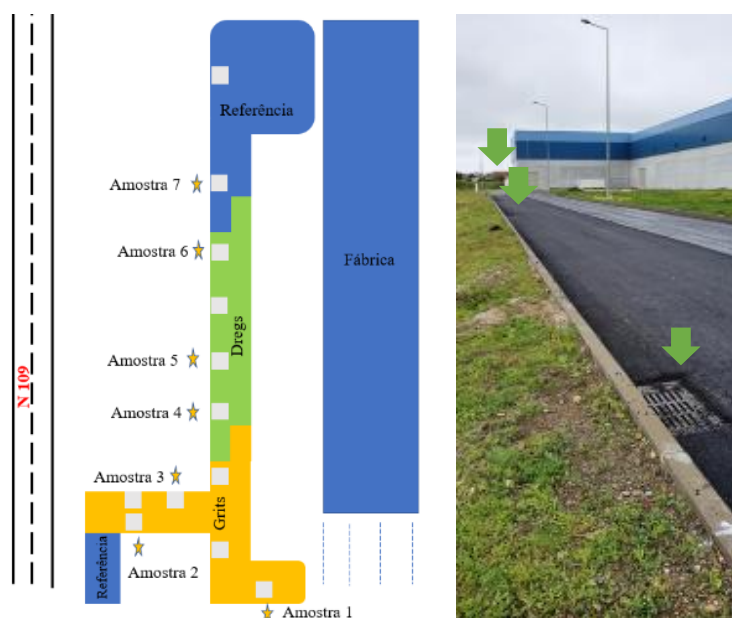


Figura 37. Sumidouros e posição onde as amostras foram recolhidas.

Quando existia precipitação, a água da chuva foi drenada pela camada superficial até aos sumidouros onde, depois, se recolhia para análise dos lixiviados nos 3 troços em estudo. No

entanto, devido aos baixos períodos de pluviosidade que ocorreram, de forma natural, no período de monitorização efetuada durante um ano, a precipitação foi também simulada pela rega da estrada com autotanque, de modo a se recolher as amostras de água nos sumidouros após a drenagem.

Alguns parâmetros dos lixiviados foram analisados mensalmente, trimestralmente e semestralmente, durante 1 ano de monitorização. Previamente à instalação do caso de estudo, os parâmetros mensais, trimestrais e semestrais foram também caracterizados para se usar como referência. Estes parâmetros foram analisados de acordo com a frequência das determinações do decreto-lei nº 183/2009 de 10 de agosto. No final, os resultados obtidos foram comparados com os valores limite dos resíduos para admissão dos resíduos em aterro de inertes. Na Tabela 43 mostram-se os resultados mensais dos teores de cloretos. A aplicação da camada de desgaste induz um ligeiro aumento do teor de cloretos, independentemente da mistura betuminosa com ou sem resíduos. Apesar deste aumento, o teor continua bem abaixo do limite definido no decreto-lei nº. 183/2009.

Tabela 43. Resultados mensais dos cloretos, nos lixiviados do sistema de drenagem do caso de estudo.

| Mês | Cloretos (mg/l) | | | Limite DL 183/2009 (mg/l), com L/S =10l/kg (resíduo inerte) |
|-----|-----------------|-------|-------|--|
| | Ref | Dregs | Grits | |
| 0 | | 5,6 | | |
| 1 | 16,5 | 16,4 | 15,7 | |
| 2 | 15,5 | 16,2 | 16,1 | |
| 3 | 17,1 | 16,5 | 16,6 | |
| 4 | 16,7 | 16,5 | 17,2 | |
| 5 | 18,4 | 18,5 | 18,5 | |
| 6 | 20,3 | 19,6 | 19,0 | 80 |
| 7 | 14,5 | 14,6 | 16,5 | |
| 8 | 12,9 | 12,3 | 16,8 | |
| 9 | 16,9 | 17,0 | 16,9 | |
| 10 | 16,8 | 17,0 | 16,9 | |
| 11 | 17,7 | 17,4 | 16,5 | |
| 12 | 16,4 | 16,1 | 16,3 | |

Na Tabela 44 apresentam-se os resultados trimestrais dos parâmetros avaliados nos lixiviados. Como referido, foram monitorizados o teor dos cloretos, de metais pesados (cromo, chumbo, mercúrio, cádmio e arsénio) e do índice de fenol. Na Tabela 45 apresentam-se os resultados semestrais dos parâmetros avaliados nos lixiviados. Esta análise foi efetuada

aos mesmos parâmetros que os analisados na análise trimestral, bem como, o teor de fluoretos, sulfatos e de metais pesados (zinco, níquel, bário, selênio e antimônio).

Tabela 44. Resultados trimestrais dos lixiviados do sistema de drenagem do caso de estudo.

| Parâmetro | Unidade | Mês 0 | | | Mês 3 | | Mês 9 | | | Limite DL183/2009 (mg/l),* |
|-----------------|----------|---------------------|---------------|--|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------------|
| | | Antes da instalação | Ref | | Dregs | Grits | Ref | Dregs | Grits | |
| Cloretos | mg/l | 5,6 | 17,1 | | 16,5 | 16,6 | 16,9 | 17,0 | 16,9 | 80 |
| Cr total | µg/L | 0,90 | <0,40(L.Q.) | | <0,40(L.Q.) | <0,40(L.Q.) | <0,40(L.Q.) | <0,40(L.Q.) | <0,40(L.Q.) | 0,05 |
| Índice de Fenol | mg/L | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | 0,1 |
| Pb | mg(Pb)/L | 0,01 | 0,003 | | 0,01 | 0,01 | 0,0044 | <0,002 (L.Q.) | 0,0024 | 0,05 |
| Hg | mg(Hg)/L | <0,01(L.Q.) | <0,01 (L.Q.) | | <0,01(L.Q.) | <0,01(L.Q.) | <0,01 (L.Q.) | <0,01(L.Q.) | <0,01(L.Q.) | 0,001 |
| Cd | mg(Cd)/L | <0,0005 (L.Q.) | <0,0005(L.Q.) | | <0,0005(L.Q.) | <0,0005 (L.Q.) | <0,0005 (L.Q.) | <0,0005 (L.Q.) | <0,0005 (L.Q.) | 0,004 |
| Cr | mg(Cr)/L | 0,004 | <0,003(L.Q.) | | <0,003(L.Q.) | 0,01 | 0,003 | <0,003(L.Q.) | <0,003 (L.Q.) | 0,05 |
| As | mg(As)/L | 0,002 | 0,001 | | 0,001 | 0,002 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,05 |

* com L/S =10l/kg para resíduo inerte.

Tabela 45. Resultados semestrais dos lixiviados do sistema de drenagem do caso de estudo.

| Parâmetro | Unidade | Mês 0 | | | Mês 6 | | Mês 12 | | | Limite DL 183/2009 (mg/l),* |
|-----------------|----------|---------------------|---------------|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| | | Antes da instalação | Ref | | Dregs | Grits | Ref | Dregs | Grits | |
| Cloretos | mg/l | 5,6 | 20,3 | | 19,6 | 19,0 | 16,4 | 16,1 | 16,3 | 80 |
| Cr total | µg/L | 0,90 | <0,40(LQ) | | <0,40 (L.Q) | <0,40(LQ) | <0,003(L.Q.) | <0,003(L.Q.) | 0,004 | 0,05 |
| Fluoretos | mg/L | <0,200 (L.Q.) | 0,23 | | 0,22 | 0,33 | <0,200(LQ) | <0,200(LQ) | <0,200(LQ) | 1 |
| Índice de Fenol | mg/L | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | <0,005(L.Q.) | 0,1 |
| Sulfatos | mg/L | 11,97 | 26,00 | | 25,83 | 22,53 | 16,60 | 15,70 | 14,53 | 100 |
| Cu | mg(Cu)/L | 0,03 | 0,04 | | 0,08 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,2 |
| Zn | mg(Zn)/L | 0,05 | 0,30 | | 0,12 | 0,83 | 0,20 | 0,49 | 1,08 | 0,4 |
| Pb | mg(Pb)/L | 0,01 | 0,01 | | ,01 | 0,01 | 0,003 | 0,006 | 0,02 | 0,05 |
| Hg | mg(Hg)/L | <0,01(L.Q.) | <0,01(L.Q.) | | 0,01 (L.Q.) | <0,01(L.Q.) | <0,01(L.Q.) | <0,01(L.Q.) | <0,01(L.Q.) | 0,001 |
| Cd | mg(Cd)/L | <0,0005 (L.Q.) | <0,0005(L.Q.) | | <0,0005(L.Q.) | <0,0005(L.Q.) | <0,0005(L.Q.) | <0,0005(L.Q.) | <0,0005(L.Q.) | 0,004 |
| Ni | mg(Ni)/L | 0,01 | 0,01 | | 0,01 | 0,01 | 0,005 | 0,004 | 0,01 | 0,04 |
| Cr | mg(Cr)/L | 0,004 | 0,01 | | 0,004 | 0,01 | <0,003(L.Q.) | <0,003(L.Q.) | 0,004 | 0,05 |
| Ba | mg(Ba)/L | 0,01 | 0,10 | | 0,08 | 0,20 | 0,08 | 0,06 | 0,02 | 2 |
| As | mg(As)/L | 0,002 | 0,018 | | 0,018 | 0,002 | 0,146 | 0,012 | 0,002 | 0,05 |
| Sb | mg(Sb)/L | 0,001 | 0,002 | | <0,001 (L.Q.) | 0,00 | <0,001(L.Q.) | <0,001(L.Q.) | 0,004 | 0,006 |
| Se | mg(Se)/L | <0,003 (L.Q) | <0,003(L.Q) | | <0,003(L.Q) | <0,003(L.Q) | <0,003(L.Q) | <0,003(L.Q) | <0,003(L.Q) | 0,01 |

* com L/S =10l/kg para resíduo inerte.

Alguns parâmetros da Tabela 44 e da Tabela 45 ,nomeadamente, o índice de fenol, mercúrio, cádmio e selênio, aparecem com a concentração abaixo do limite de quantificação, consequentemente, estão longe dos valores limite do DL 183/2009 para resíduos inertes. Por outro lado, outros parâmetros (teor de cloretos, crômio, zinco, chumbo, níquel, bário, arsênio

e antimónio) contém concentrações superiores ao limite de quantificação, contudo abaixo do limite definido para resíduos inertes do DL 183/2009. Assim, globalmente, a avaliação ambiental dos lixiviados das misturas betuminosas, *in situ*, diz que se cumpriu nestes troços de estrada com os limites impostos para a deposição de resíduos inertes em aterro e não causou nem tem potencial para causar algum dano no ambiente ou na saúde humana.

5.1.3. Análise da viabilidade técnica

O setor da construção aplica uma vasta gama de produtos que contém a marcação CE, sendo que esta certificação atesta que o produto apresenta determinado desempenho. Por exemplo, os agregados para misturas betuminosas devem obedecer a uma norma harmonizada de produto (EN 13043), bem como, as misturas betuminosas do grupo “betão betuminoso” estão harmonizadas pela norma de produto EN 13108-1. Estas normas de produto estabelecem um conjunto de propriedades base que estão definidas no anexo nacional e devem ser analisadas para que se possa emitir uma declaração de desempenho (IPQ, 2006, 2004^a).

Em relação ao agregado fino referido como pó de calcário (0/4 mm), comercializado em Portugal para misturas betuminosas, as declarações de desempenho dos produtores declaram sobretudo características como a granulometria, a qualidade dos finos (azul de metileno) e a massa volúmica (Calbrita, 2021; Iberobrita, 2022; Lenaagregados, 2020; Sicobrita, 2015). Por outro lado, os produtores de betuminosos que produzem a mistura para o tipo AC 14 *surface* declaram principalmente a porosidade, a sensibilidade à água, a percentagem de ligante, a temperatura da mistura e a granulometria da mistura de agregados (Calbrita, 2021; Iberobrita, 2022; Lenaagregados, 2020; Sicobrita, 2015).

Além das declarações de desempenho, os agregados e as misturas betuminosas devem respeitar os requisitos definidos nos cadernos de encargos das obras. Neste caso, os limites ou requisitos da mistura betuminosa (sem resíduo) estão definidos no caderno de encargos tipo obra (CETO) das Infraestruturas de Portugal (EP, 2014).

Na Figura 38 mostra-se o fuso granulométrico do betão betuminoso do qual a mistura betuminosa (AC 14 *surface*) deve obedecer para poder ser utilizada na aplicação de uma camada de desgaste, ou regularização e de ligação (EP, 2014). No entanto, existe outro tipo de betão betuminoso para camadas de desgaste, designado por betão betuminoso rugoso.

Esta mistura apresenta limites diferentes nos peneiros de 10, 4, 2, 1, 0,5, 0,125 e 0,063 mm relativamente ao fuso expresso na Figura 38 (EP, 2014).

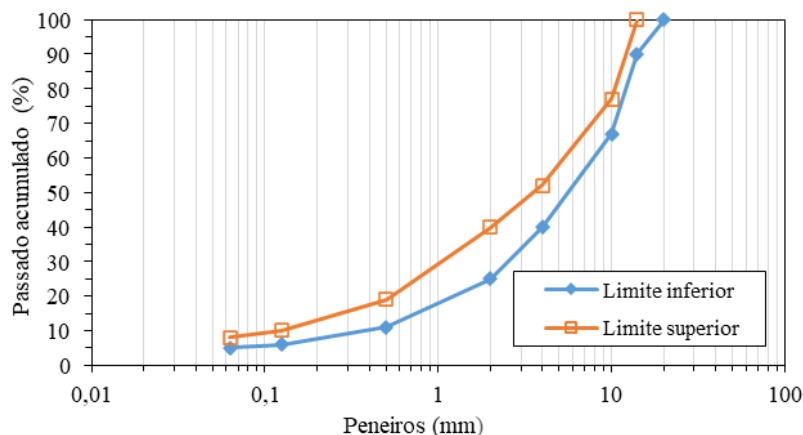


Figura 38. Limites do fuso granulométrico do AC 14 *surface* (EP, 2014) .

Tabela 46. Requisitos que os agregados naturais devem obedecer para serem utilizados na produção do betão betuminoso (Martinho *et al.*, 2018).

| Propriedade | Norma de ensaio | Unidade | Camada de base | Camada de ligação | Camada de desgaste |
|--|-----------------------|-------------------|---|--------------------|--|
| Qualidade dos finos 3 -10% >10% | EN 933-9 | g/kg | MB _F 10 | MB _F 10 | MB _F 10 |
| Índice de achatamento | EN 933-3 | - | FL ₃₀ | FL ₂₅ | FL _{15&20} ^(*) |
| Percentagem de superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos | EN 933-5 | % | C _{100/0} | C _{100/0} | C _{100/0} |
| Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente Los Angeles | EN 1907-2 | % | LA ₄₀ | LA ₃₅ | LA ₂₀ |
| Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro-Deval | EN 1907-1 | % | MDE ₂₅ | MDE ₂₀ | MDE ₁₅ |
| Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste | EN 1907-8 | % | - | - | PSV ₅₀ |
| Massa volúmica das partículas | EN 1907-6 | Mg/m ³ | Declarar Valor | | |
| Absorção à água | EN 1907-6 | % | ≤2 ≤1 | | |
| Baridade | EN 1907-3 | Mg/m ³ | Declarar Valor | | |
| Resistência ao gelo e ao degelo, valor de absorção de água como ensaio de triagem e valor do sulfato de magnésio | EN 1907-6 e EN 1367-2 | % | Se WA>2, depois MS ₃₅ | | |
| Resistência ao gelo e ao degelo, valor de absorção de água como ensaio de triagem e valor do sulfato de magnésio | EN 1907-2 e EN 1367-5 | % | Declarar Valor | | |
| “Sonnenbrand” do basalto | EN 1907-3 e EN 1367-3 | % | Perda de massa após a ebulição ≤ 1 e SBLA ≤ 8 | | |
| Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos | EN 12697-11 | % | Declarar Valor | | |

FL₂₀ – requisito para betão betuminoso e FL₁₅ – requisito para betão betuminoso rugoso

Além do cumprimento do fuso granulométrico (Figura 38), os diferentes agregados naturais utilizados na produção de misturas de betão betuminoso (AC 14 *surface*) têm um conjunto de características que deve ser respeitado, como se pode ver na Tabela 46. Contudo, o desempenho de algumas propriedades dos agregados do AC 14 *surface* para uma camada de desgaste é mais restrito do que os agregados para as outras camadas (de ligação e de regularização), nomeadamente o índice de achatamento, o coeficiente de micro-deval, o coeficiente *Los Angeles* ou o coeficiente de polimento acelerado.

De seguida, as características do produto final (betão betuminoso) devem estar enquadradas nos limites expressos na Tabela 47. O limite do quociente de Marshall do betão betuminoso para uma camada de ligação e de regularização é diferente do limite da Tabela 47, bem como, do limite da porosidade do betão betuminoso rugoso. Ou seja, o limite do quociente de *Marshall* passa a ser ≥ 2 mm, assim como o limite da porosidade passa a ser de 3 a 6%.

Tabela 47. Requisitos/propriedades do AC 14 *surface* (EP, 2014)

| Amostra | Limites CETO | Norma de Ensaio |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Baridade | - kg/m ³ | EN 12697-6 |
| Baridade Máxima Teórica | - kg/m ³ | EN 12697-5 |
| Porosidade | 3 a 5 % | EN 12697-8 |
| VMA | ≥ 14 % | EN 12697-8 |
| VFB | - | EN 12697-8 |
| Deformação | $2 \leq F \leq 4$ mm | EN 12697-34 |
| Estabilidade | $7,5 \leq S \leq 15$ kN | EN 12697-34 |
| Quociente Marshall | ≥ 3 kN/mm | EN 12697-34 |
| IRC | 80 | MIL STD 620 (método 104) |

Tabela 48. Valores limite de lixiviação para admissão em aterros para resíduos inertes (DRE, 2009).

| Componente | Limite (mg/kg) de matéria-seca L/S=10 l/kg | Componente | Limite (mg/kg) de matéria-seca L/S=10 l/kg |
|------------|--|-----------------|--|
| As | 0,5 | Sb | 0,06 |
| Ba | 20 | Se | 0,1 |
| Cd | 0,04 | Zn | 4 |
| Cr total | 0,5 | Cloreto | 800 |
| Cu | 2 | Fluoreto | 10 |
| Hg | 0,01 | Sulfato | 1000 |
| Mo | 0,5 | Índice de fenol | 1 |
| Ni | 0,4 | COD | 500 |
| Pb | 0,5 | SDT | 4000 |

Ao nível técnico, a viabilidade das soluções tradicionais deve ser avaliada pelo cumprimento dos requisitos técnicos da Tabela 46, Tabela 47 e Figura 38. Além disso, estas soluções não podem ter materiais prejudiciais para o meio ambiente ou, que comprometam o desempenho das obras. Deste modo, os lixiviados das soluções devem estar de acordo com os valores limite da deposição de resíduos em aterro de inertes (Tabela 48).

Quando se passa para a valorização de resíduos em misturas betuminosas, a demonstração ou a implementação do caso de estudo deve garantir que não existe nenhuma incerteza nos seguintes aspetos (EAPA, 2020):

- Saúde e segurança dos trabalhadores e do público em geral, durante a fase de aplicação, de uso e de fim de vida;
- Viabilidade técnica da mistura betuminosa;
- Impactos ambientais e/ ou responsabilidade no momento do uso ou no futuro;
- Custo de aquisição da mistura betuminosa pelo cliente, sabendo que poderão existir possíveis problemas de desempenho como, por exemplo a necessidade de estabelecer camadas mais espessas para o mesmo desempenho;
- Competitividade da solução desenvolvida *versus* solução tradicional.

Relativamente à viabilidade técnica, a caracterização efetuada aos *dregs* e aos *grits* (Tabela 32 e Figura 26) mostra que cumprem com os requisitos exigidos (Tabela 46) para agregados de granulometria extensa para uma mistura do tipo AC 14 *surface*, nomeadamente, em termos da qualidade dos finos e da distribuição granulométrica para um agregado com dimensões entre 0 e 4 mm (0/4).

Quanto à incorporação dos *dregs* e dos *grits* num betão betuminoso, os resultados da monitorização sobre as misturas betuminosas (Tabela 34, Tabela 35 e Figura 27) cumprem os requisitos exigidos para o betão betuminoso (Figura 38 e Tabela 47), com um ligeiro desvio nos valores da porosidade e da resistência conservada na mistura com *dregs*. No entanto o desvio é tão pequeno para a taxa de incorporação usada que, ou diminuindo o teor em *dregs* ou ajustando o teor ótimo de betume, estes dois incumprimentos menores poderiam ser corrigidos, de modo a garantir o melhor desempenho das misturas. No entanto, as inspeções visuais (Tabela 39) realizadas sobre o caso de estudo, assim como, os resultados de monitorização com as carotes extraídas (Tabela 37, Tabela 38, Figura 35 e Figura 36) mostraram que esta mistura betuminosa com *dregs* tem o mesmo desempenho do que a

solução tradicional de referência. Ou seja, os níveis de degradação e de desempenho estão ao mesmo nível da mistura tradicional, apesar do incumprimento nos requisitos da porosidade e da resistência conservada.

Além da viabilidade técnica, os resultados das novas soluções (Tabela 36, Tabela 43, Tabela 44 e Tabela 45) cumpririam também com os limites exigidos para deposição dos resíduos em aterro de inertes (Tabela 48). Deste modo, as misturas betuminosas não representam nenhum perigo para o meio ambiente e para a saúde humana.

Demonstrada a viabilidade técnica, que garante o desempenho destas misturas com resíduos, os próximos etapas passam pela análise dos impactos ambientais gerados pelas novas soluções, bem como, a análise dos seus custos de aquisição e produção. Ou seja, a competitividade e impactos da nova solução são outros fatores que deveriam ser e foram avaliados relativamente à solução tradicional (referência).

5.1.4. Transição para a economia circular

A utilização dos resíduos como matéria-prima alternativa aos materiais naturais deve garantir vantagens técnicas e ambientais relativamente às soluções adotadas no modelo linear (Turk *et al.*, 2015). Além disso, o cumprimento das especificações técnicas não é o único fator decisivo na implementação de soluções desenvolvidas. Existem outros aspetos que devem ser considerados, nomeadamente, a legislação, o preço, as infraestruturas de produção e o transporte (Quina e Pinheiro, 2020).

No modelo linear são utilizados recursos naturais (britas, pó e betume) que não necessitam de nenhuma operação intermédia suplementar entre o produtor de agregados e o produtor das misturas betuminosas, ou seja, os materiais são incorporados diretamente na central de betuminoso. Contudo, no modelo circular não se necessita, nos agregados naturais a substituir, das operações de extração, moagem e crivagem das rochas e, portanto, as operações de recolha e pré-tratamento dos resíduos comparam-se com esta fase de extração e transformação dos agregados naturais.

Analisando o modelo circular da incorporação dos resíduos (*dregs* e *grits*) aplicado às misturas betuminosas, teve de se eliminar os constrangimentos identificados, nomeadamente, os relativos ao necessário ajuste do tamanho de partícula, ao ajuste da humidade por secagem e ao seu transporte para a central. Por se tratar de resíduos entendeu-se, por razões legais e económicas, que este pré-tratamento e transporte dos mesmos seria

melhor ser feito por um operador de gestão de resíduos que esteja licenciado para manusear os *dregs* e os *grits*. Ou seja, o operador deve ter uma licença para manusear resíduos pelo menos com o código LER “03 03 02 – Lamas da lixívia verde (provenientes da valorização da lixívia de cozimento)” e ter a operação R 12 “Troca de resíduos com vista a submetê-los a uma das operações enumeradas de R1 a R11”, na sua licença de operação.

Além do cumprimento do quadro legal em vigor, existe outra condicionante técnica relativa à humidade dos resíduos e que foi corrigida antes dos resíduos serem incorporados nas misturas betuminosas, visto que a central de betuminoso não recebia matérias-primas com teor de humidade excessivo. Deste modo, os resíduos necessitam também de uma secagem, preferencialmente realizada pelo operador de gestão de resíduos para se evitar mais transporte e circulação dos resíduos, que contribuíram para aumentar os impactes ambientais e económicos. Antes do transporte para a central de betuminoso, os resíduos necessitam também de uma crivagem, de modo a criar um material uniforme e adequado à substituição que irá fazer na mistura.

Quando a central de betuminoso recebeu os resíduos (*dregs* e *grits*), estes não passaram pelo habitual tambor-secador de mistura, ou seja, a central possui uma linha com uma tremonha pré-doseadora extra, normalmente a linha do material fresado (para reciclagem), que permitiu incorporar os resíduos com os restantes agregados das misturas.

Deste modo, na implementação do modelo circular foi relevante encontrar um operador de gestão de resíduos com instalações para o pré-tratamento requerido e uma central que cumprisse com as necessidades acima identificadas para incorporar os resíduos.

Após o cumprimento dos requisitos de desempenho técnico da solução circular, é necessário que os *dregs* e *grits* ingressem num processo de desclassificação dos resíduos, para que estes materiais já não sejam regulados pela legislação dos resíduos e possam ser usados pelo setor da construção como matérias primas alternativas, uma vez que consigam também a marcação CE enquanto agregado, de modo a garantir a conformidade do produto. Esta operação não está no âmbito deste trabalho, mas é um passo importante a efetuar após as operações de validação do desempenho técnico e da avaliação dos impactes ambientais e económicos que permitam a sua realização.

Ao nível da produção, o setor português de pasta e papel produziu cerca de 2,729 milhões de pasta e papel em 2016, para as quais foram gerados 54 460 toneladas destes resíduos (*dregs* e *grits*) (Nordlander *et al.*, 2018). A quantidade destes resíduos pode ser dividida em

aproximadamente 29 705 t e 24 755 t (em base húmida) de *dregs* e de *grits*, respetivamente, de acordo com as taxas de produção na Tabela 28.

Considerando este volume de resíduos e o processo de secagem dos mesmos (Tabela 31), no operador de gestão de resíduos, seria possível produzir aproximadamente 20 794 e 21 165 t de *dregs* e de *grits*, respetivamente, como agregados alternativos. Assim, a implementação deste modelo de negócio evitaria a extração de 41 959 t de recursos naturais (pó de calcário) ao serem utilizados estes resíduos na produção de misturas betuminosas.

Contudo, outros aspetos terão de ser analisados em termos de um modelo de economia circular, nomeadamente o custo de transporte e de aquisição, bem como, a distância aconselhável de transporte. Além disso, é necessário realizar uma análise local, ou seja, analisar a disposição das unidades de produção de resíduos, das misturas betuminosas e dos operadores de gestão de resíduos, bem como, os locais de extração de recursos naturais, de modo a tornar a solução competitiva relativamente ao modelo linear (produção de misturas betuminosas sem resíduos e com deposição dos resíduos em aterro). Estes aspetos que versam os impactes ambientais e económicos serão tratados para os dois casos piloto em estudo nos capítulos 6 e 7 desta tese.

5.2. Valorização de resíduos em betão pré-fabricado

A cadeia de valor da construção é responsável pelo desenvolvimento social e económico da sociedade, mas, ao mesmo tempo, gera uma cota elevada de impactos ambientais que advém do consumo elevado de recursos naturais, nomeadamente energia, água, solo, matérias-primas e outros materiais (Colangelo *et al.*, 2018; Estanqueiro *et al.*, 2018; Hossain *et al.*, 2016). Um contribuinte ativo desta cadeia de valor é a indústria do cimento, argamassas e betões que consome um volume elevado de agregados naturais e de energia e, ao mesmo tempo, que emite um valor elevado de CO₂ para a atmosfera. Deste modo, o setor pode contribuir para a transição para uma economia sustentável de baixo carbono, devido à sua capacidade de incorporar resíduos industriais (Costa e Marques, 2018).

As soluções apresentadas pelo subsector industrial do betão pré-fabricado são largamente usadas no mundo como material de construção, o que faz com que o setor necessite de grandes volume de recursos, especialmente agregados, água, ligantes e aditivos (Teixeira *et al.*, 2016; Turk *et al.*, 2015). Na Figura 39 mostra-se uma distribuição típica dos

diferentes recursos usados no betão, onde claramente se destaca o elevado volume de agregados envolvido.

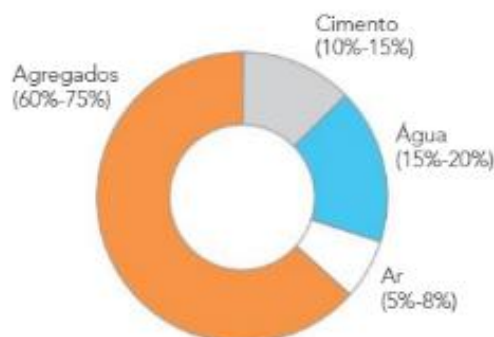


Figura 39. Constituição do betão (% em volume) (APEB, 2020).

Ao nível de produção de betão, o setor europeu do betão produziu cerca de 320 milhões de m³ em 2018, dos quais 70 milhões de m³ foram da indústria do betão pré-fabricado e do betão fabricado *in situ*, enquanto o restante foi produzido em estaleiros de betão pronto (ERMCO, 2019).

Deste modo, esta indústria necessita de novas matérias-primas, alternativas às naturais, de modo a evitar a erosão dos solos e a destruição dos ecossistemas pela extração em grande escala de matérias-primas naturais, como o caso do componente maioritário (agregados). Além disso, a produção do ligante tradicionalmente usado (cimento) tem também elevados impactos ambientais associados, devido à necessidade de grande quantidade de energia e de matérias primas naturais no fabrico de clínquer (Kim *et al.*, 2016; Turk *et al.*, 2015). Deste modo, uma possível estratégia passa pela incorporação de resíduos ou subprodutos do setor da construção ou de outras indústrias no processamento de ligantes e agregados, desde que induzam o mesmo desempenho técnico das matérias-primas tradicionalmente usadas (Martinho *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2019; Turk *et al.*, 2015). Ao mesmo tempo, esta solução evita a deposição de resíduos em aterro, neste e noutros sectores como o da indústria de pasta e papel, salvaguardando matérias primas naturais como o calcário, granito e argilas, entre outros.

5.2.1. Descrição do caso de estudo

Atualmente o modelo de negócio do sector do betão pré-fabricado e da indústria de pasta e papel seguem um modelo tipicamente linear em que recursos são extraídos, processados, consumidos e depois eliminados no seu fim de vida, como se pode ver na Figura 40.

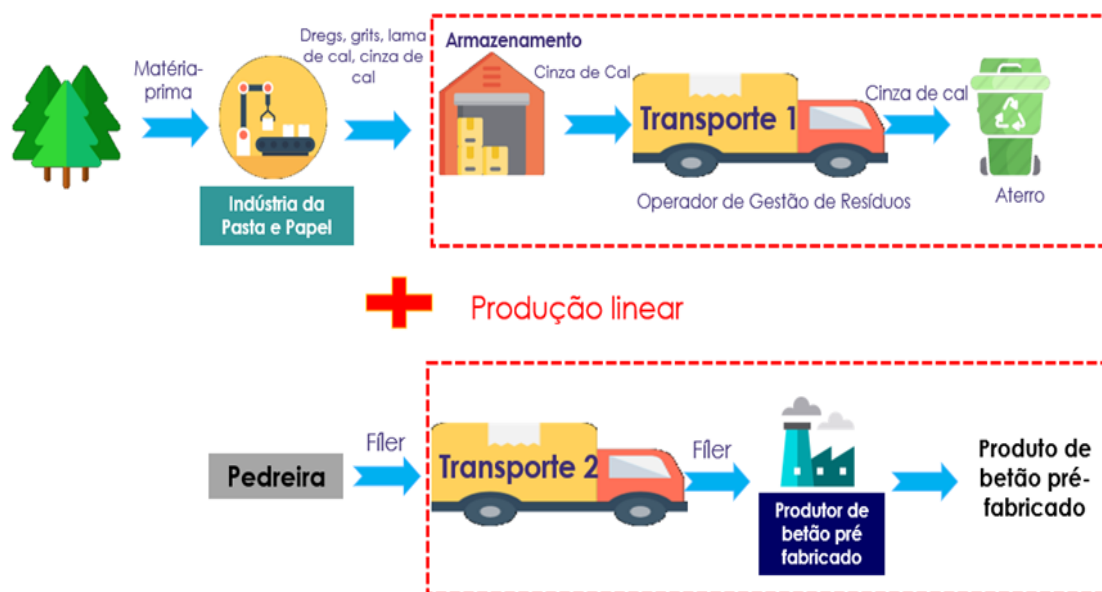
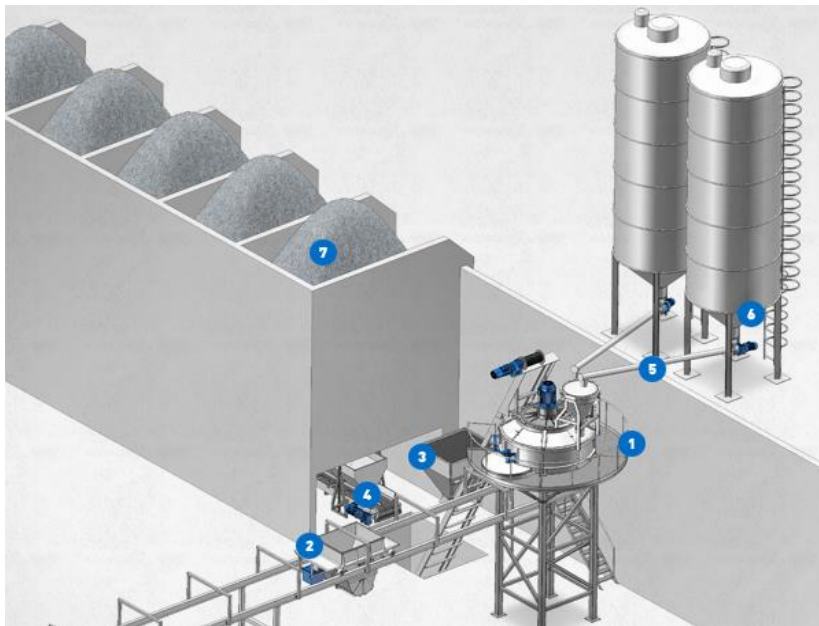


Figura 40. Modelo de produção linear do setor de pasta e papel e do setor de betão pré-fabricado.

No caso da indústria do betão pré-fabricado, as matérias-primas principais (agregados e cimento) são provenientes de recursos não renováveis, que depois são transportados dos locais de extração (pedreiras e cimenteiras, respetivamente) até ao local de produção (indústria do betão pré-fabricado). Posteriormente, a produção do betão (Figura 41) começa com o carregamento e deposição das areias e britas na unidade de alimentação da central de betão onde, depois, são pesadas e transportadas até à misturadora da central. De seguida, um dos agregados (o filler), o cimento e ainda outros aditivos (superplastificante) são adicionados à misturadora, provenientes dos diversos silos que a central possui. Seguidamente, é adicionada água para se produzir o betão que é então descarregado numa vagoneta (Cunha, 2020; Lage, 2013). Após a descarga, a vagoneta segue até ao local de descarga do betão (unidade de pré-fabricação), de modo a betonar os diferentes elementos pré-fabricados como, por exemplo neste caso de estudo piloto, as asnas e os pilares.



1. Misturadora do betão
2. Vagonete
3. Skip elevador de inertes (passadeira)
4. Tapete de pesagem
5. Sem-fim
6. Silo de cimento, aditivos e filler
7. Cubas de agregados

Figura 41. Esquema de central de betão (ILMAR, 2022).

Além dos resíduos (*dregs* e *grits*) que foram descritos no caso de estudo do subcapítulo 5.1, a indústria de pasta e papel gera um outro resíduo interessante para este sector do betão pré-fabricado, designado por cinza de cal (Figura 42). Este resíduo é gerado na calcinação das lamas de carbonato de cálcio que resultam da etapa da caustificação (Figura 19), constituindo um resíduo que tem como principal destino a deposição no aterro controlado de resíduos não perigosos da unidade fabril (Buruberry *et al.*, 2015; Cunha, 2020; Marques, 2015; Quina e Pinheiro, 2020)..



Figura 42. Amostra do resíduo (cinza de cal)

Alguns trabalhos de investigação efetuaram a caracterização química e mineralógica deste resíduo (Tabela 49 e Tabela 50), respetivamente.

Tabela 49. Identificação da composição química dos diferentes resíduos por XRF.

| Parâmetro (%wt) | Cinza de cal | | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| | (Madrid <i>et al.</i> , 2018) | (Qin <i>et al.</i> , 2015) | (Simão <i>et al.</i> , 2017) | (R. C. E. Modolo <i>et al.</i> , 2014) |
| SiO ₂ | 0,03 | 3,4 a 11 | 1,06 | 0,29 |
| CaO | 50,31 | 44,4 a 52 | 53,55 | 51,8 |
| Al ₂ O ₃ | 0,01 | 0,5 a 1,4 | 0,22 | 0,2 |
| K ₂ O | 0,17 | - | <0,05 | 0,1 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,09 | 0,2 a 1,2 | 0,16 | 0,03 |
| MgO | 0,19 | 0,6 a 3,4 | 0,91 | 0,48 |
| SO ₃ | 1,48 | - | - | - |
| Na ₂ O | 2,83 | - | 1,06 | 1,9 |
| P ₂ O ₅ | 0,04 | - | 0,65 | 0,9 |
| MnO | 0,01 | - | 0,1 | - |
| TiO ₂ | 0,01 | - | <0,05 | - |
| LOI | 46,10 | 31,5 a 43,5 | 42,25 | 43,47 |

Tabela 50. Identificação da composição mineralógica dos diferentes resíduos por DRX.

| Cinza de cal | | | |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|--|
| (Madrid <i>et al.</i> , 2018) | (Qin <i>et al.</i> , 2015) | (Simão <i>et al.</i> , 2017) | (R. C. E. Modolo <i>et al.</i> , 2014) |
| Calcite -CaCO ₃ | Calcite -CaCO ₃ | Calcite -CaCO ₃ | Calcite -CaCO ₃ |
| Cal - CaOH | - | - | - |

Estas análises mostraram que o resíduo tem um alto teor em cálcio e que a calcite é o mineral maioritário comum nas diferentes caracterizações. Sabendo que o betão pré-fabricado incorpora frequentemente filler proveniente de rochas calcárias, constituído por calcite com alto teor de carbonato de cálcio, a valorização deste resíduo (lamas ou cinzas de cal) tomou-se evidente para as indústrias que utilizem matérias-primas com composição idêntica aos resíduos. Neste sentido, Modolo *et al.* (R. C. E. Modolo *et al.*, 2014) demonstraram à escala laboratorial o potencial da incorporação da lama de cal até 30% do cimento na produção de argamassas.

Contudo, as lamas de cal apresentam-se com uma humidade embora baixa, ainda elevada para serem incorporadas como filler em materiais cimentícios, por isso, a solução deve contemplar um processo de secagem prévia para se eliminar a humidade. No caso da indústria de pasta e papel, esta humidade é eliminada de outra forma no seu processo produtivo, quando da calcinação das lamas de cal, gerando as cinzas de cal, usadas por isso aqui neste trabalho.

Garantida a exequibilidade técnica da solução à escala laboratorial, o próximo passo envolve a análise da solução à escala real industrial. Neste sentido, foi desenvolvido este caso de estudo da valorização do resíduo (cinza de cal) em betão pré-fabricado à escala industrial. O objetivo é criar uma simbiose industrial entre o setor da indústria de pasta e papel e o setor do betão pré-fabricado, de modo a criar um modelo de produção circular que beneficie ambos os setores. Um aspeto relevante é o facto da escolha ter sido feita de modo a que estas empresas estivessem próximas entre si (a menos de 25 km) minimizando-se os impactes do transporte excessivo e, por outro lado, que os resíduos ao serem usados como matéria-prima alternativa permitissem, ao mesmo tempo, evitar a sua deposição em aterro pela indústria de pasta e papel e também o consumo de recursos naturais pela indústria do betão pré-fabricado. Na Figura 43 mostra-se o esquema do modelo circular do betão pré-fabricado pelo uso do resíduo da indústria de pasta e papel (cinza de cal).

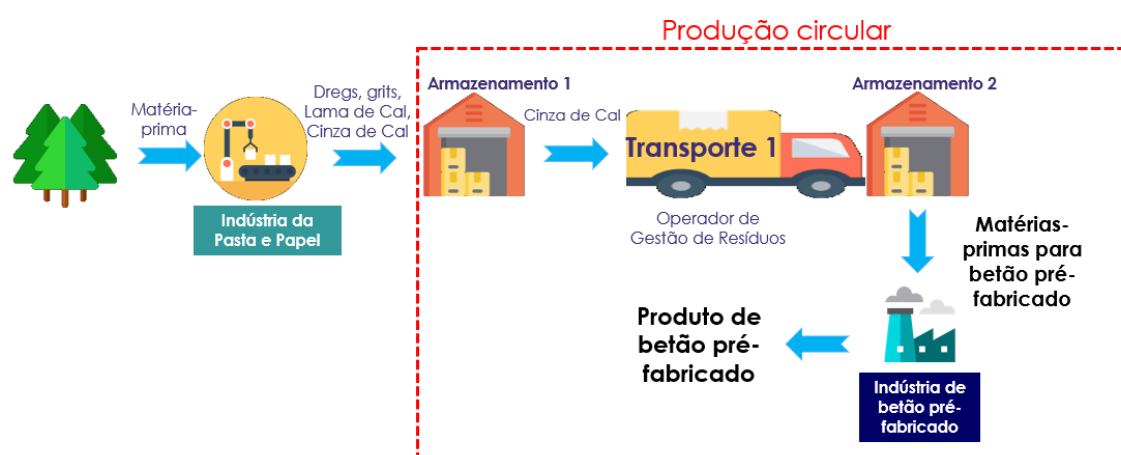


Figura 43. Modelo de produção circular no betão pré-fabricado com cinza de cal.

Este modelo (Figura 43) não carece de passos ou intermediários para se realizar pré-tratamentos pois a humidade, a composição química e a distribuição do tamanho de partícula é já adequada e semelhante ao filler natural correntemente usado pela indústria do betão pré-fabricado. Deste modo, o transporte das cinzas pode ser logo realizado num camião-cisterna, que depois, as bombeará para um silo na unidade fabril do betão pré-fabricado. Será a partir deste silo que as cinzas de cal substituirão integralmente o filler calcário natural na produção do betão pré-fabricado. No entanto, neste caso piloto, como ainda se trata de um resíduo não desclassificado e a empresa do betão pré-fabricado que o incorporará, não pode realizar o

transporte do mesmo, este teve que ser assegurado por um operador de gestão de resíduos licenciado para operações com resíduos de código LER 03 03 09.

O subsetor da pré-fabricação usa um conjunto de moldes para produzir um conjunto diverso de produtos que têm várias formas e dimensões como, por exemplo, os elementos lineares estruturais (asnas e pilares) ou os elementos de fundações. Após a betonagem e desmoldagem, os vários produtos são enviados para serem montados na obra de destino da utilização planeada.

A qualidade dos diversos tipos de elementos em betão pré-fabricado é garantida pelas normas de produto, bem como, através da aposição da marcação CE. Estas normas de produto definem os requisitos, características e os métodos de ensaio para este tipo de produtos. Por exemplo, os pilares e as asnas são elementos lineares, regulados pela norma de produto EN 13225 que define, entre outros parâmetros, uma classe mínima (C20/25 e C30/37) para elementos armados e elementos pré-esforçados em betão, respetivamente (IPQ, 2015).

Deste modo, o caso de estudo centrou-se na produção industrial de quatro pórticos com elementos em betão pré-fabricado, sendo um o betão de referência, com uma formulação tradicional do betão pré-fabricado e, em que os outros três pórticos foram produzidos com betão onde o filler natural usado foi integralmente substituído por cinzas de cal, o resíduo da indústria de pasta e papel. Na Figura 44 mostra-se a disposição dos quatro pórticos de betão.

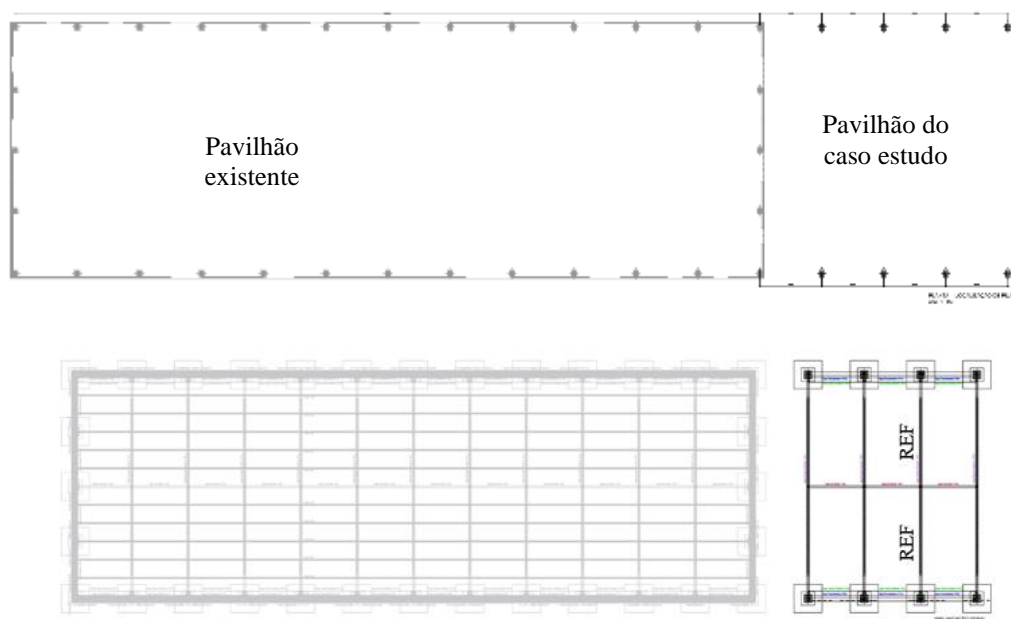


Figura 44. Disposição dos quatro pórticos do caso de estudo.

Os pórticos (Figura 44) foram constituídos por pilares e vigas de secção variável (asna). Na Tabela 51 mostram-se as características técnicas dos pilares que suportaram as vigas de secção variável, enquanto na Tabela 52, se mostram as características técnicas das vigas de secção variável.

Tabela 51. Características dos pilares do caso de estudo.

| Pilar | |
|-----------------|--------------------|
| Secção | 0,5*0,4 m |
| Altura | 10,25 m |
| Betão | C _{30/37} |
| Volume de betão | 2,1 m ³ |

Tabela 52. Características das asnas do caso de estudo

| Asna | |
|-----------------------|--------------------|
| Secção nos topos | 0,4*0,56 m |
| Secção ½ vão | 0,4*1,4 m |
| Comprimento | 19,8 m |
| Comprimento ½ vão | 9,8 m |
| Betão | C _{40/45} |
| Volume de betão | 5 m ³ |
| Distância entre asnas | 5 m |

Os constituintes do betão usado para produzir as vigas de secção variável e dos pilares foram uma brita calcária (12/25), brita calcária (8/12), areia grossa, areia fina, cimento, filler, superplastificante e água. Na Figura 45 e Figura 46 mostra-se a secção transversal da viga de secção variável e da secção transversal do pórtico, respetivamente.

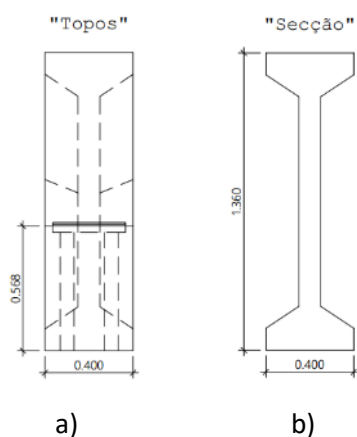


Figura 45. Viga de secção variável: a) Secção nos topos; B) Secção ½ vão.

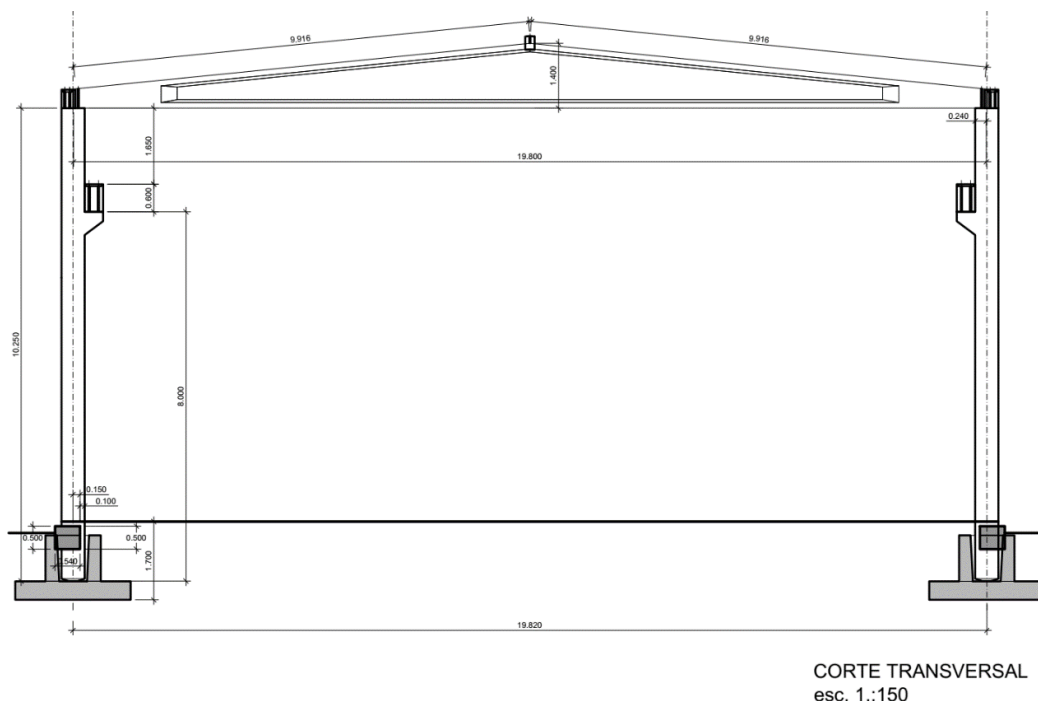


Figura 46. Secção transversal do pórtico do pavilhão industrial.

Assim, este caso de estudo passou pelo teste do resíduo como matéria-prima alternativa ao filler natural na produção de betão pré-fabricado, de modo a se criar uma alternativa à matéria-prima tradicional, mas sem alterar as condições de produção e as características finais do betão. Por isso, a quantidade de resíduo (cinza de cal) usado neste trabalho para substituir o filler natural foi pequena (cerca de 4% da mistura de sólidos) mas intencional, no sentido de ser suficiente para se avaliar o seu impacto, mas num contexto em que se esgotava localmente este resíduo produzido, evitando recorrer a transporte de longa distância (>25 km) para outras empresas de betão pré-fabricado.

Simultaneamente, neste caso piloto foi também testado o processo de licenciamento ambiental por envolver operações de valorização de resíduos. Assim, o código do processo de licenciamento (PL) conseguido para este caso de estudo foi o PL20190405000538 e que, consequentemente, permitiu obter o respetivo título único ambiental (TUA) com o código TUA20190719000282 (Ferreira *et al.*, 2020).

Tal como no outro caso piloto, este processo de licenciamento foi principalmente efetuado para se avaliar as eventuais barreiras que a legislação ambiental pode impor, mesmo em casos simples de incorporação de resíduos, a uma transição para um modelo de economia circular mas, esta discussão nos dois casos pilotos será efetuada no capítulo 7.

5.2.2. Execução e monitorização do caso piloto

Como se referiu acima, previamente à execução técnica deste caso de estudo foi submetido um processo de licenciamento ambiental, pela via simplificada do DL nº 73/2011 (alínea f). Este processo de licenciamento ocorreu de forma semelhante ao processo de licenciamento do caso de estudo da valorização dos *dregs* e dos *grits* nas misturas betuminosas. Neste contexto foram estabelecidos para o ensaio à escala real o uso de 6 tons de cinzas de cal, para a incorporação na produção do betão pré-fabricado, na forma de um conjunto de 6 pilares e 3 vigas de secção variável para 3 pórticos contendo este resíduo.

Após a obtenção da licença ambiental para executar o caso piloto, a implementação do caso de estudo requereu à colaboração direta do produtor de pasta e papel e do produtor do betão pré-fabricado. Para intermediar a operação foi necessário efetuar o transporte do resíduo por um operador licenciado de gestão de resíduos, de modo a cumprir os requisitos legais dos transportes de resíduos. Na Tabela 53 mostram-se as 13 etapas deste modelo de tipo circular para o implementar à escala industrial, que envolvia a produção e edificação de quatro pórticos dum pavilhão industrial.

Na produção do pórtico de referência, as etapas são as mesmas do modelo circular (Tabela 53), mas na formulação do betão mantém-se o tradicional filler calcário, proveniente de uma pedreira, em vez do resíduo (cinza de cal). O filler natural percorre uma distância de 82 km da pedreira até ser descarregado num silo do produtor do betão, que depois o adiciona à misturadora na central de betão. Por outro lado, a fábrica de pasta e papel está afastada 1,5 km do aterro de resíduos, onde a cinza de cal vai ser depositada no caso do modelo linear ou neste betão de referência que não o contém.

Comparativamente a este valor de 83,5 km de transporte o uso da cinza de cal como filler alternativo na implementação do modelo circular (Tabela 53), requereu apenas o armazenamento e descarga da cinza de cal num contentor fechado (etapa nº 1 da Tabela 53), de modo a ser transportado até à unidade de produção dos elementos de betão pré-fabricado que dista apenas de 23 km da unidade de produção de pasta e papel. Esta diferenças do modelo circular para o linear em termos de impactes serão apresentados e discutidos no capítulo 6.

A incorporação do filler alternativo foi realizada de forma manual (etapa nº2 da Tabela 53), por facilidade de logística sendo, de seguida, o betão transportado na fábrica por uma vagoneta aérea, desde a central de mistura da formulação até ao local da betonagem dos

diferentes elementos do pórtico (asnas e pilares) (etapa nº3 da Tabela 53). Previamente a esta betonagem dos elementos, ocorre a montagem das armaduras e do pré-esforço (apenas para as asnas) e a montagem da cofragem dos elementos (etapa nº4 da Tabela 53). Estes elementos estão em conformidade com as características definidas na Figura 45, Figura 46 e nas Tabela 51 e Tabela 52. Para efeitos de monitorização durante os 12 meses seguintes, foram incorporados numa asna com cinza de cal e aa asna com o betão de referência, dois sensores internos (a 1/2 e a 1/3 do vão). Ambos os sensores (etapa nº5 da Tabela 53) foram instalados na parte superior da asna, de modo a permitir monitorizar a temperatura e a deformação nos meses seguintes à sua montagem enquanto pórticos. Estes sensores são do tipo *VW embedment strain gages* (modelo 1240).

Após a montagem da armadura e a cofragem dos elementos lineares, ocorreu a betonagem dos elementos, bem como, a vibração dos mesmos, de modo a compactar o betão da forma como é correntemente feita. Além disso, foram também retiradas amostras de betão para se realizar o controlo de qualidade periódico dos diferentes betões, para se garantir as exigências da resistência para os diferentes elementos (etapa nº6. Da Tabela 53). De seguida, os elementos betonados (etapa nº7 da Tabela 53) permanecem nos moldes até adquirir a resistência adequada a serem desmoldados para, depois, serem enviados como produto final para o local de expedição (etapa nº8 da Tabela 53).

Simultaneamente à produção destes elementos ocorreu a preparação do terreno (Figura 44) através da utilização de uma máquina pesada para abrir as fundações e se instalar as sapatas de betão pré-fabricadas (etapa nº 9 da Tabela 53).

Após a instalação das sapatas (etapa nº10 da Tabela 53), são montados os pilares do pavilhão industrial (etapa nº11 da Tabela 53). Nesta fase é adicionado betão para promover a ligação sapata-pilar e garantir a adesão e imobilidade entre os elementos. Por fim, as asnas, bem como, as vigas de travamento (etapa nº12 da Tabela 53). São apoiadas nos pilares, de modo a finalizar a montagem dos pórticos ((etapa nº13 da Tabela 53).

Tabela 53. Implementação do modelo circular do betão pré-fabricado incorporando cinza de cal.

1. Armazenamento da cinza de cal na indústria de pasta e papel;



2. Transporte da cinza de cal para a misturadora do betão pré-fabricado;



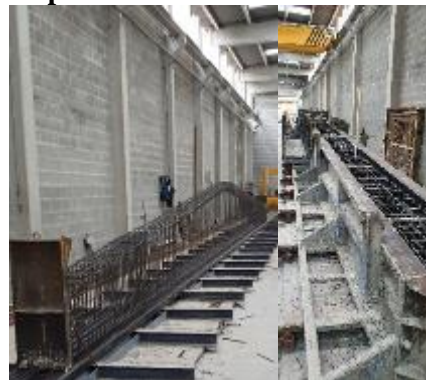
3. Mistura de betão preparado para aplicação;



4. Preparação da cofragem e da armadura para os pilares e asnas



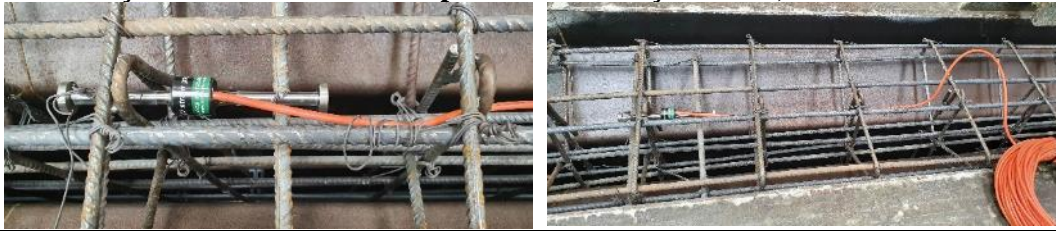
Pilar



Asna

Tabela 53. (continuação) Implementação do modelo circular do betão pré-fabricado.

5. Instalação dos sensores internos para monitorização *in situ*;



6. Betonagem dos elementos lineares e recolha de amostras para monitorização;



7. Processo de secagem e cura dos elementos lineares;



8. Pilares e asnas como produto final para expedição;



Pilares



Asnas

9. Preparação do terreno;



Tabela 53. (continuação) Implementação do modelo circular do betão pré-fabricado.

10. Execução das fundações diretas;



11. Montagem dos pilares;



12. Montagem das asnas e das vigas de travamento;



13. Estrutura final dos pórticos;



Antes da incorporação da cinza de cal como filler alternativo na formulação do betão pré-fabricado, esta foi caracterizada em laboratório no sentido de avaliar as semelhanças ou diferenças com o filler natural. Na Figura 47 mostra-se o aspeto visual do filler natural e da cinza de cal.

O betão de referência usa agregados naturais (areias, britas, filler) e como ligante o cimento Portland. Estas matérias-primas têm a marcação CE, ou seja, algumas propriedades ou características, tais como a densidade e a distribuição granulométrica são declaradas na sua ficha técnica de produto (IPQ, 2015, 2004b).

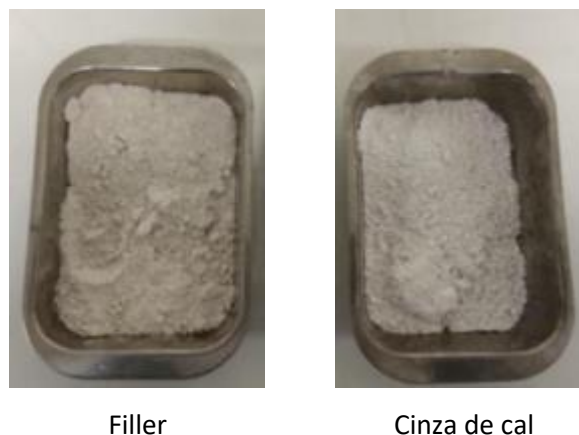


Figura 47. Análise visual comparativa entre a cinza de cal e o filler natural.

Uma das características a controlar que vem identificada na norma de produto de agregados para betão (EN 12620) é a granulometria dos agregados. Estes dividem-se tipicamente em agregados grossos, finos, de granulometria extensa e filler. Este último é definido como “*um agregado cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhe conferir certas propriedades*”. Além disso, define os requisitos granulométricos que um filler deve cumprir nos peneiros com abertura de 2, 0,125 e 0,063 mm (IPQ, 2004b). Na Figura 48 apresentam-se os resultados obtidos sobre a granulometria do filler natural e da cinza de cal, de acordo com a norma de ensaio EN 933-10.

Para ser considerado um filler, a cinza de cal deve ter pelo menos 70% das partículas inferiores a 63 microns e, como é possível observar na Figura 48, o tamanho das partículas da cinza de cal cai dentro do limite definido para um filler, possibilitando assim utilizar a cinza de cal como um filler.

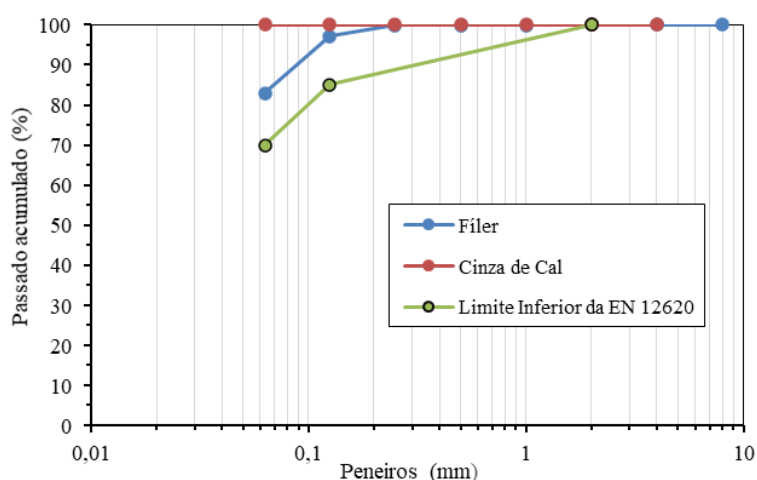


Figura 48. Análise granulométrica do filler natural e da cinza de cal.

A análise granulométrica da cinza de cal, por ser tão fina, foi realizada num equipamento *Coulter LS 230*, sendo as medidas realizadas com as amostras dispersas em água. Na Figura 49 e na Tabela 54 mostra-se a distribuição de partícula da fração inferior a 63 μm da cinza de cal e do filler natural, tendo os resultados mostrado possuírem uma distribuição bastante semelhante.

Tabela 54. Distribuição granulométrica da fração < 63 μm da cinza de cal e do filler natural.

| %V | Diâmetro da partícula (μm) | |
|-----|---|----------------|
| | Cinza de Cal | Filler Natural |
| 10 | 0,648 | 0,232 |
| 25 | 3,023 | 1,149 |
| 50 | 7,992 | 2,725 |
| 75 | 15,12 | 5,615 |
| 100 | 22,12 | 15,19 |

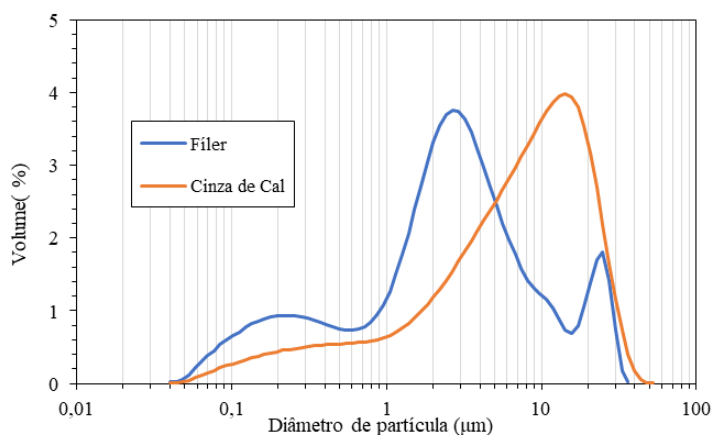


Figura 49. Curva granulométrica da fração <63 μm da cinza de cal e do filler natural.

Além da distribuição de partículas, outras propriedades foram caracterizadas em laboratório, nomeadamente a densidade, a qualidade dos finos, a área superficial específica e a composição mineralógica. Na Tabela 55 mostram-se para comparação as características do filler e da cinza de cal.

Tabela 55. Características da cinza de cal e do filler.

| Parâmetro | Norma de ensaio | Filler natural | Cinza de cal | Unidade |
|-----------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|-------------------|
| Densidade da partícula | EN 1907-6 | 2,66 | 2,60 | Mg/m ³ |
| Qualidade dos finos | EN 933-9 | 0,1 | 0,2 | g/kg |
| Área superficial específica | Método BET | 0,786 | 1,156 | m ² /g |
| Composição | Análise DRX | Calcite (100%) | Calcite (96%) e cal (4%) | - |

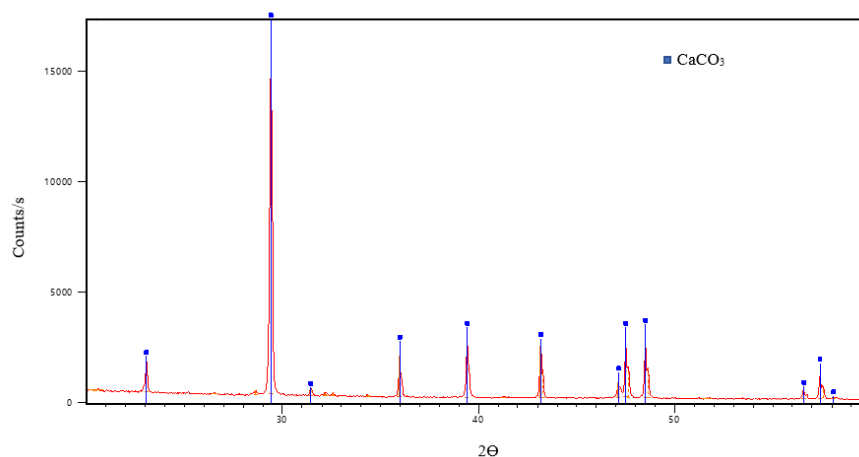


Figura 50. Difratograma de raios-X do filler natural.

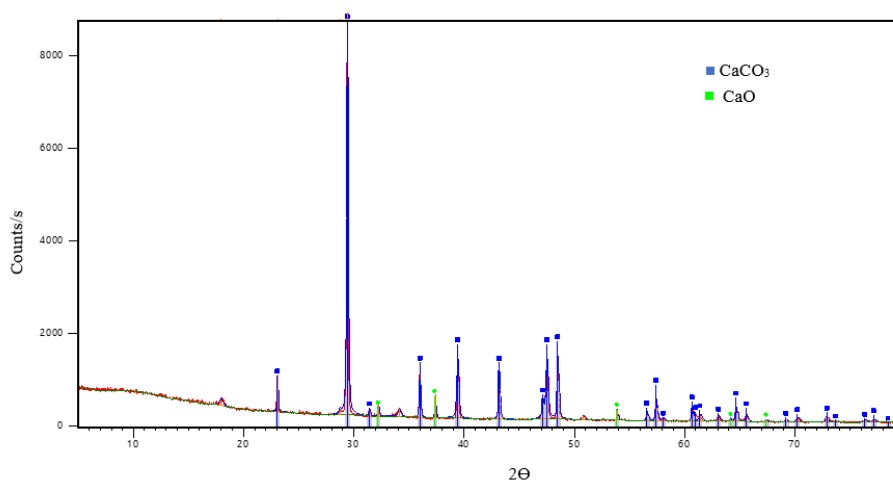


Figura 51. Difratograma de raios-X da cinza de cal.

A composição identificada na Tabela 55 foi realizada na fração inferior a 63 μm e permitiu identificar qualitativamente as fases cristalinas que estavam presentes na amostra da cinza de cal e do filler natural. Deste modo, na Figura 50 e Figura 51 apresenta-se o difratograma de raios-X, bem como, a identificação dos minerais. A amostra de cinza de cal contém principalmente carbonato de cálcio, sendo também o composto identificado como principal na amostra de filler natural.

Desta forma, a cinza de cal foi introduzida nas formulações de modo a substituir integralmente o filler calcário natural usado na produção de betão pré-fabricado, ou seja, das asnas e dos pilares (2,4% e 4,4% de filler, respetivamente).

Na Tabela 56 mostra-se a formulação do betão de referência na produção de pilares e das asnas (1 pórtico). Deste modo, os 54 e 104 kg de filler natural por m^3 de betão das asnas e dos pilares, respetivamente, foram totalmente substituídos pelo resíduo da indústria de pasta e papel nas formulações com resíduo (3 pórticos).

Tabela 56. Formulação do betão de referência para se produzir os elementos lineares dos pórticos.

| | Massa Volúmica (Mg/m^3) | Pilares (kg/m^3) | Asna (kg/m^3) |
|------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------|
| Brita calcária (12/25) | 2,61 | 660 | 660 |
| Brita calcária (8/12) | 2,57 | 379 | 379 |
| Areia grossa | 2,61 | 563 | 563 |
| Areia fina | 2,61 | 330 | 330 |
| Cimento | 3,06 | 246 | 300 |
| Filler natural | 2,70 | 104 | 54 |
| Superplastificante | 1,05 | 3,3 | 4,15 |
| Água | 0,99 | 74 | 80,10 |

Durante a betonagem dos elementos lineares (etapa nº6 da Tabela 53), foram também produzidos provetes cúbicos (com $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$), que foram curados numa câmara a 20°C de temperatura e 95% de humidade relativa ambiente (Figura 52), de modo a se realizar o controlo laboratorial do plano de monitorização.



Amostras para monitorização

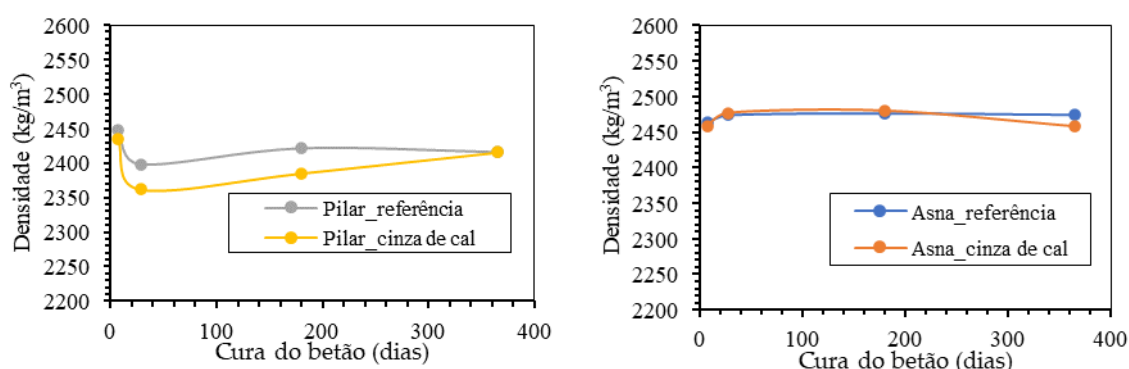
Cura dos provetes de betão

Figura 52. Recolha e cura dos provetes de betão com cinza de cal e de filler natural.

Ao longo do tempo de cura do betão (aos 7, 28, 180 e 365 dias), 12 amostras do modelo circular (betão com cinza de cal) e do modelo linear (betão de referência) foram ensaiadas no laboratório, de modo a avaliar a:

- Densidade do betão endurecido, de acordo com o procedimento da EN 12390-7;
- Resistência à compressão, de acordo com o procedimento da EN 12390-3 e, posteriormente, o grau de carbonatação do betão através da pulverização de um indicador (fenolftaleína);
- Velocidade do pulso ultrassónico e módulo de elasticidade, de acordo com o procedimento da EN 12504-4, exceto aos 7 dias de cura.

Na Figura 53 mostra-se a densidade no estado endurecido das composições resultantes das soluções lineares e circulares (sem e com resíduo). A densidade do betão com cinza de cal é ligeiramente inferior à densidade do betão de referência, mas em nenhum caso excede mais de 2%, pelo que o comportamento da densidade do betão com resíduo pode ser considerado similar relativamente ao betão de referência.

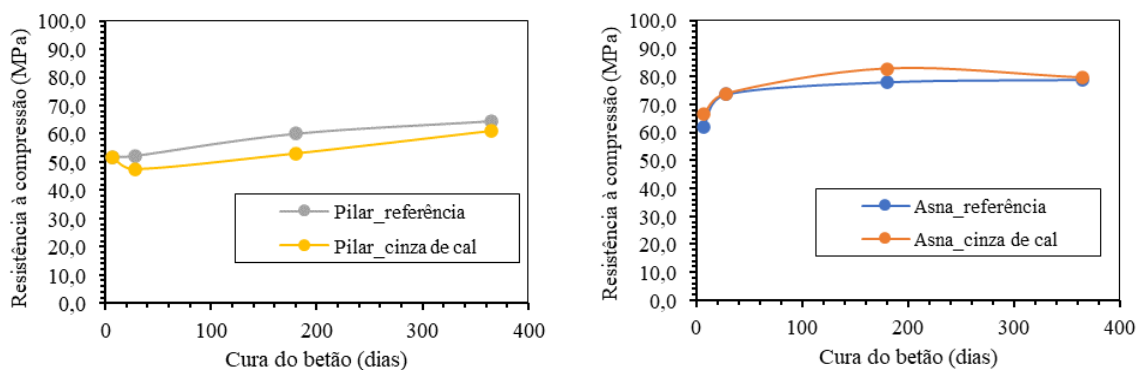


a) Densidade do betão endurecido do pilar

b) Densidade do betão endurecido da asna

Figura 53. Densidade dos pilares e das asnas de betão no estado endurecido.

No âmbito da monitorização do betão ao longo de 1 ano, a incorporação da cinza de cal na formulação não alterou o comportamento da resistência à compressão relativamente ao betão sem resíduo, como se pode ver na Figura 54. A norma harmonizada do betão pré-fabricado de elementos lineares estabelece uma classe mínima de resistência à compressão para pilares e asnas. No início do caso de estudo foi definido como referência C30/37 e C40/45 para pilares e asnas, respetivamente, tendo em conta o valor do betão de referência. Deste modo, aos 28 dias de cura, o requisito de projeto foi atingido em ambas as composições (>50Mpa e >70Mpa, respetivamente).



a) Resistência à compressão do pilar

b) Resistência à compressão da asna

Figura 54. Resistência à compressão dos pilares e das asnas de betão no estado endurecido.

Após o ensaio da resistência à compressão, as superfícies dos provetes curados (aos 7, 28, 180 e 365 dias) foram pulverizadas com fenolftaleína, de modo a analisar o grau de hidratação do betão. Este grau está relacionado com a produção *portlandite* revelada pela alteração de cor da fenolftaleína resultante da carbonatação no betão. Na inspeção visual, a cor rosa deste indicador aparece quando a *portlandite* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) está presente como um produto de hidratação. Caso a carbonatação da *portlandite* tivesse ocorrido, a superfície pulverizada teria aparecido incolor. Deste modo, na Figura 55 mostra-se o grau de hidratação, onde é possível observar a mesma intensidade da cor rosa em composições de betão com filler natural bem como nas composições de betão com cinza de cal.

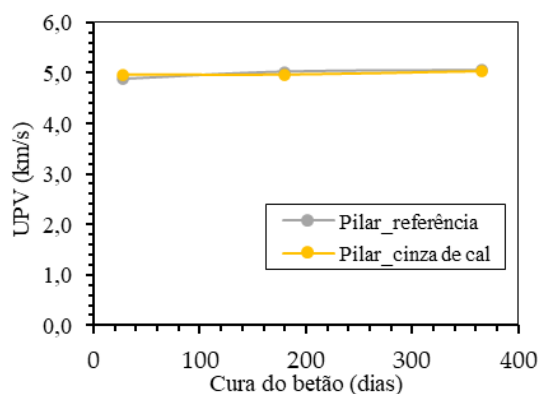


Figura 55. Controlo do grau de hidratação do betão.

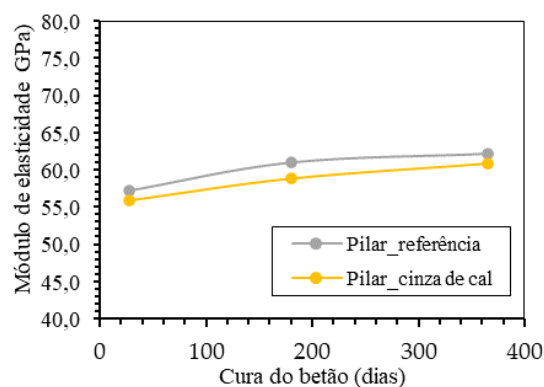
No quadro dos ensaios da monitorização em laboratório, o módulo de elasticidade e a velocidade do pulso ultrassónico (UPV) foram avaliados pelo método não destrutivo do *PUNDIT- Portable Ultrasonic Non-Destructive Indicating Tester*) para todas as composições e realizados aos 28, 180 e 365 dias de cura. Este ensaio permitiu aferir

inicialmente a velocidade do pulso ultrassónico através do quociente entre o comprimento da amostra de betão e o tempo de transmissão do impulso ultrassónico. O produto do valor da densidade do betão pelo quadrado da velocidade do pulso ultrassónico permite obter uma estimativa do módulo de elasticidade. A determinação da velocidade do pulso ultrassónico (UPV) permite aferir sobre a qualidade do betão, classificando-o como excelente, boa, questionável, pobre e muito pobre. Dado que o UPV dos betões (Figura 56 a) e c)) foi superior a 4,5 km/s, tal equivale a um betão de excelente qualidade.

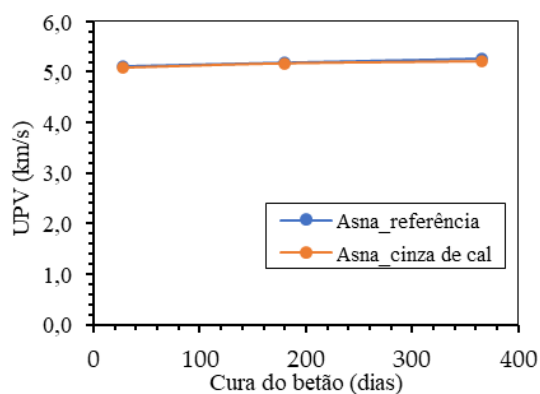
Relativamente ao módulo de elasticidade (Figura 56 b) e d)), este aumenta ligeiramente ao longo do tempo de cura, devido ao aumento verificado na densidade do betão entre os 28 e 365 dias de cura (Figura 53), visto que, a UPV permanece sensivelmente constante entre os 28 e 365 dias de cura. Assim, quando se incorporou o resíduo como filler alternativo, o módulo de elasticidade e a UPV apresentam valores próximos do betão com filler natural (Figura 56).



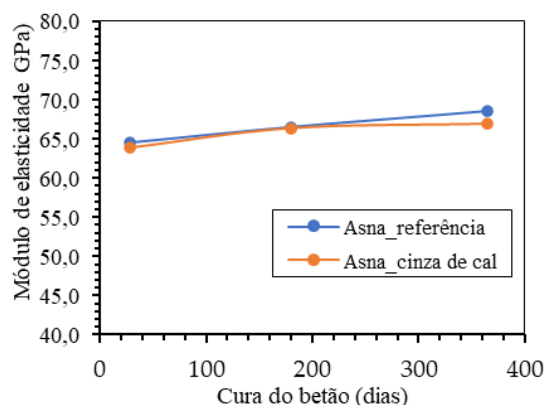
a) UPV do pilar



b) Módulo de elasticidade do pilar



c) UPV da asna



d) Módulo de elasticidade da asna

Figura 56. UPV e módulo de elasticidade do betão dos pilares e das asnas.

Simultaneamente aos 28, 180 e 365 dias de cura, 3 amostras do modelo circular (betão com cinza de cal) e do modelo linear (betão de referência) foram ensaiadas no laboratório, de modo a avaliar outros parâmetros como:

- Absorção de água, de acordo com o a especificação portuguesa E394;
- Coeficiente de capilaridade, de acordo com o procedimento da EN 1015-18;
- Controlo dos sais solúveis, através de uma série de ciclos húmido/seco.

Na Figura 57 e Figura 58 mostram-se os resultados da absorção de água e do coeficiente capilaridade das composições com e sem resíduo, respetivamente. Para ambas as propriedades, as composições que incorporam cinza de cal seguem o mesmo comportamento das composições com filler natural. Ou seja, à medida que a hidratação do cimento ocorre ao longo do tempo, os poros capilares do betão diminuem e, conseqüentemente, a absorção de água diminui com o tempo de cura. Além disso, a redução dos poros no betão também contribuirá para a redução da absorção capilar de água, ao longo do tempo.

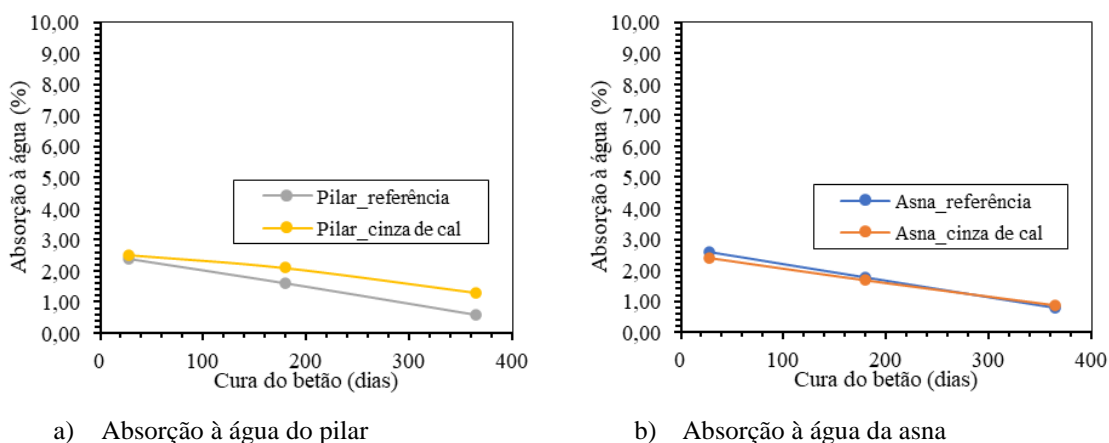


Figura 57. Absorção da água do betão dos pilares e das asnas.

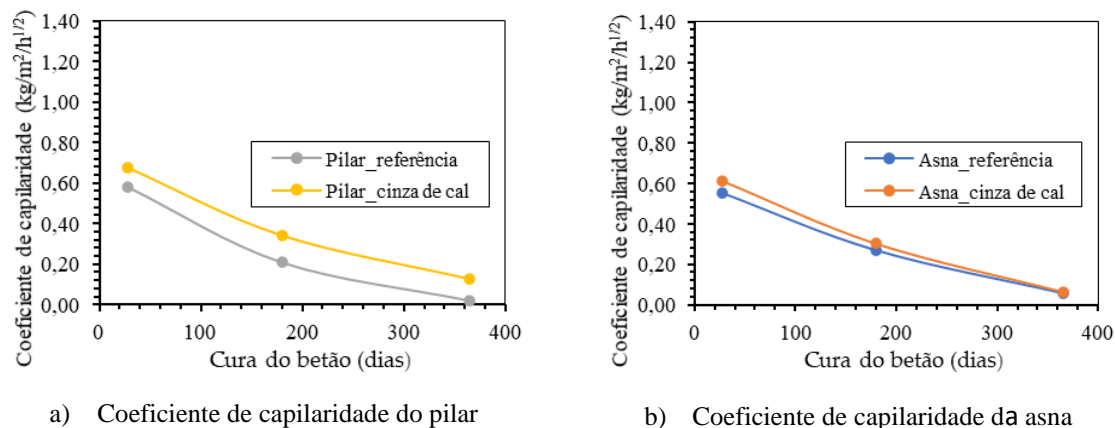


Figura 58. Coeficiente de capilaridade do betão dos pilares e das asnas.

Durante os ciclos de molhagem e secagem dos provetes para se medir a absorção de água, efetuou-se também o controlo de sais solúveis. Assim, todas as amostras de betão com 28, 180 e 365 dias de cura não apresentaram eflorescências na sua superfície, (Figura 59). Além do controlo dos sais solúveis, o controlo do pH e do teor de cloretos foi também efetuado antes e após 6 meses de imersão em água destilada. Os resultados destas avaliações não mostraram alterações significativas entre as composições com e sem cinza de cal.



Figura 59. Controlo das eflorescências no betão.

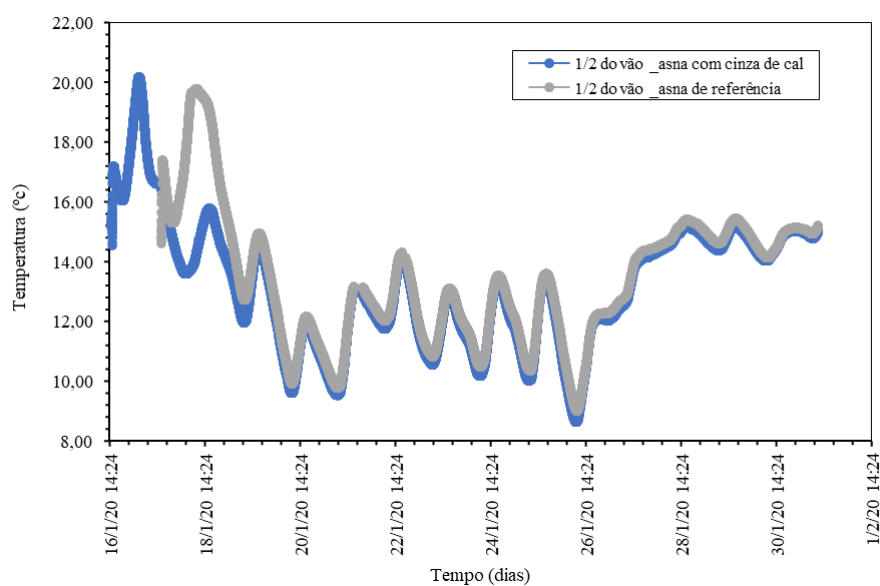
Paralelamente à monitorização laboratorial efetuou-se também a monitorização *in situ*. Este controlo foi efetuado durante um ano através de inspeções visuais mas, também, através dos sensores internos e externos instalados no betão. Ao nível interno, os sensores internos tinham sido já previamente colocados a $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{3}$ do vão e ambos a uma profundidade de 10 cm abaixo da superfície da asna de betão (Figura 60).



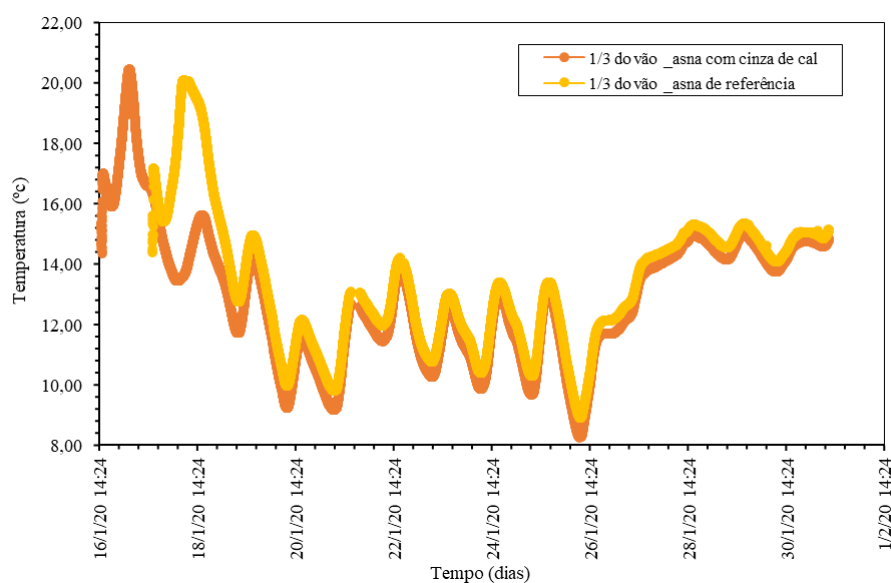
Figura 60. Instalação dos sensores internos ($\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{3}$ vão).

O betão com cinza de cal e o de referência foram betonados a 16 e 17 de janeiro de 2020, respetivamente. Os sensores foram ligados a um registador (*data logger*) que foi registando ao longo do tempo os valores da temperatura e de frequência. De seguida, os valores de

frequência foram convertidos para valores de microdeformação (*microstrain* ($\mu\epsilon$)) através da calibração de cada sensor. Após três dias de cura, o pré-esforço foi transmitido pela aderência do betão. A recolha de dados foi interrompida 15 dias após a cura (31/01/2020), para se armazenar as vigas no local de expedição e assim desocupar as linhas de produção. Na Figura 61 e Figura 62 mostra-se a temperatura e a deformação registada pelos sensores instalados desde a betonagem. Nas idades iniciais, a temperatura e a deformação apresentam valores similares para asnas com filler natural e com a cinza de cal.

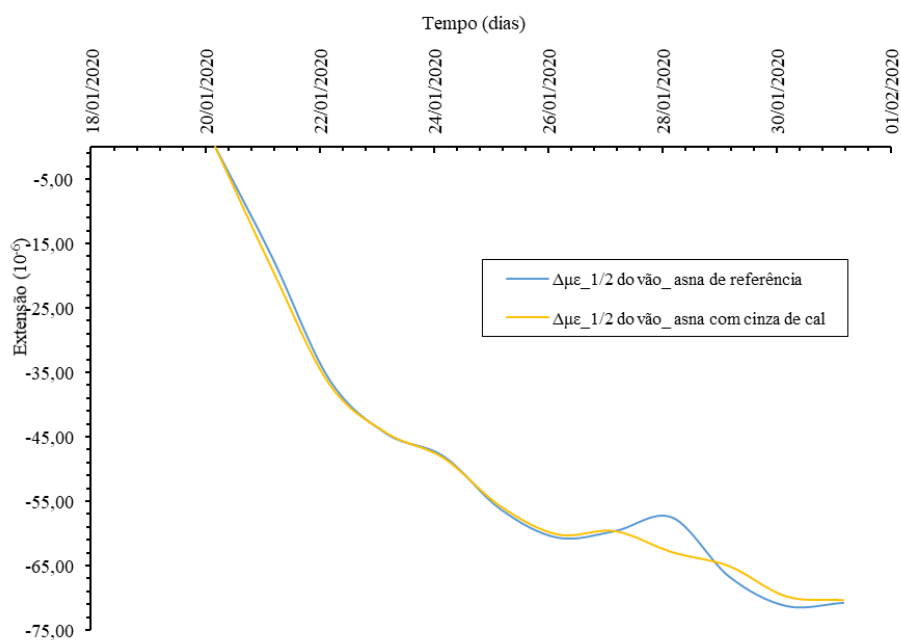


a) 1/2 do vão da asna

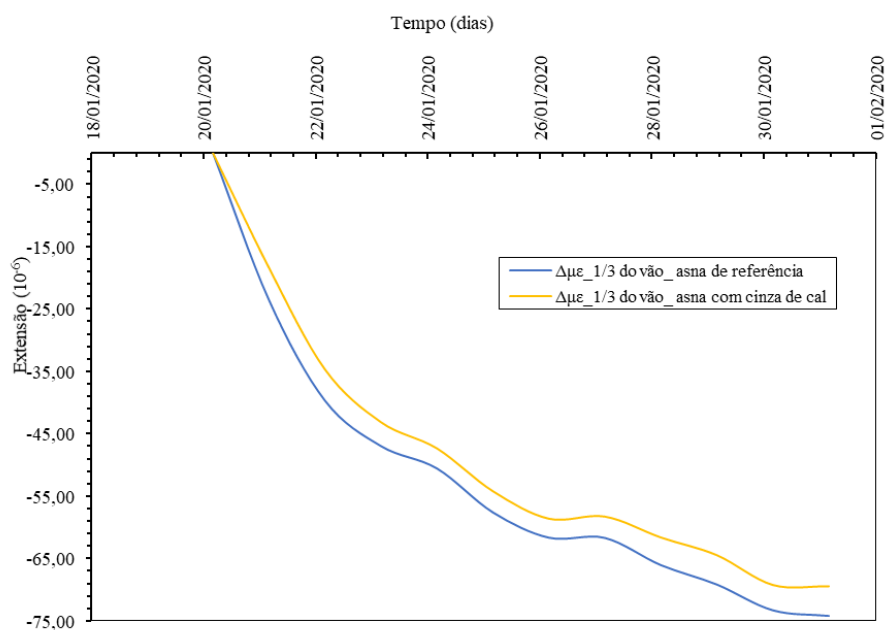


b) 1/3 do vão da asna

Figura 61. Temperatura após betonagem até 31/1: a) sensor a 1/2 vão; b) sensor a 1/3 vão.



a) 1/2 do vão da asna



b) 1/3 do vão da asna

Figura 62. Deformações após betonagem até 31/1: a) sensor a 1/2 do vão; b) sensor a 1/3 do vão.

Os elementos lineares mantiveram-se na expedição até 18 de fevereiro de 2020 e, durante uma semana, a estrutura dos quatro pórticos (asna e pilares) foi montada, de modo a se construir o pavilhão industrial. No dia 23 de março de 2020, foi instalado um sensor externo (Figura 63) para monitorizar a temperatura e a humidade relativa (HR) do ar e assim avaliar

as características de exposição dos pórticos de betão. Além disso, também foram instalados três sensores no exterior da asna, que ficaram instalados a meio vão e na posição superior, média e inferior da viga (Figura 64). Estes sensores são do tipo *VW weldable strain gages* (modelo 1220).



a) Sensor externo (temperatura e humidade)

b) *Data logger*

Figura 63. A) sensor externo que regista a temperatura do ar e a humidade relativa; b) *data logger* para registo da frequência e temperatura dos sensores internos e externos.

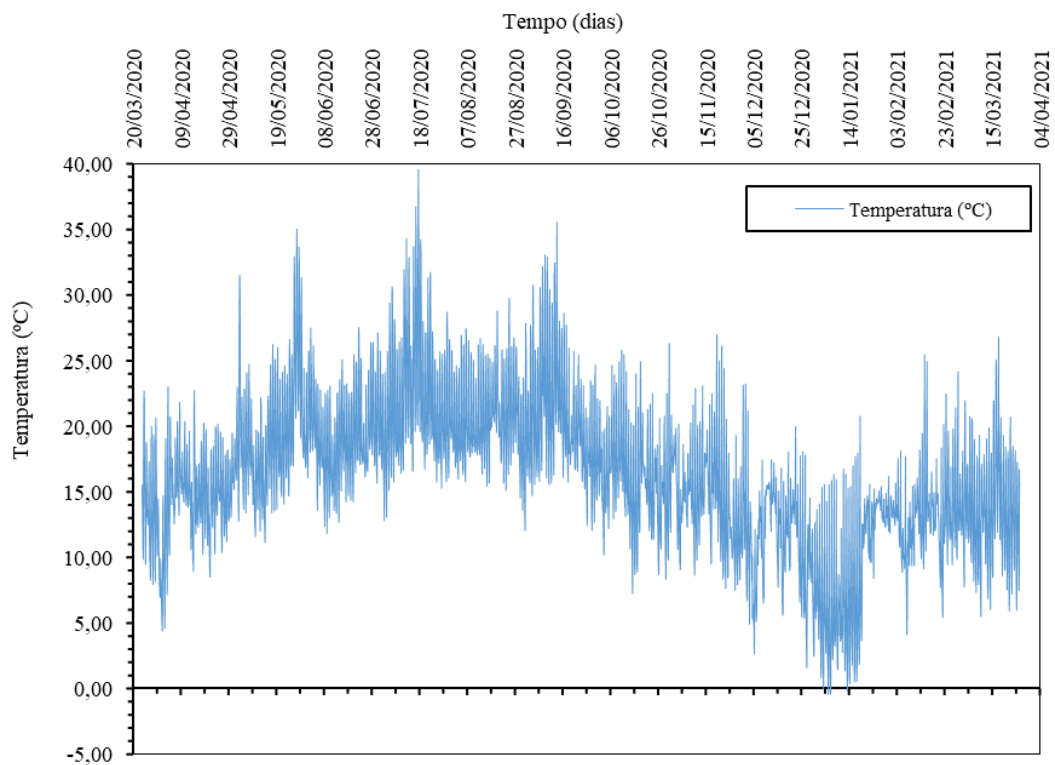


a) Sensor externo (1/2 vão da asna)

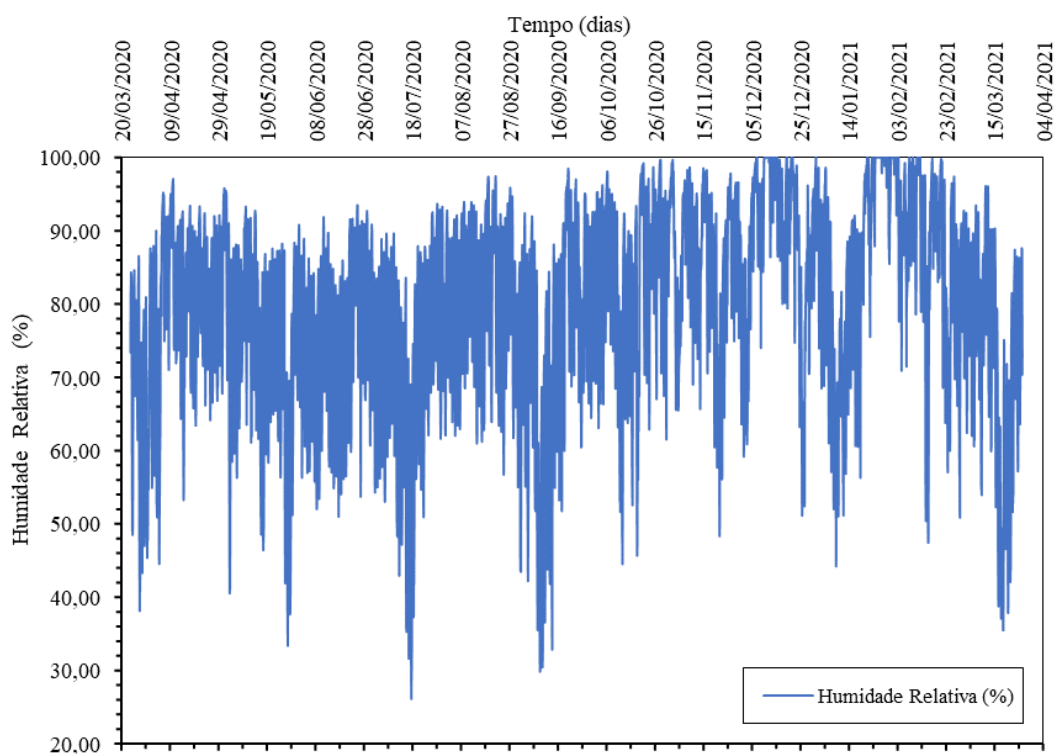
b) Posição

Figura 64. A) Sensor externo (a 1/2 do vão na asna); b) posição (superior, intermédia, inferior).

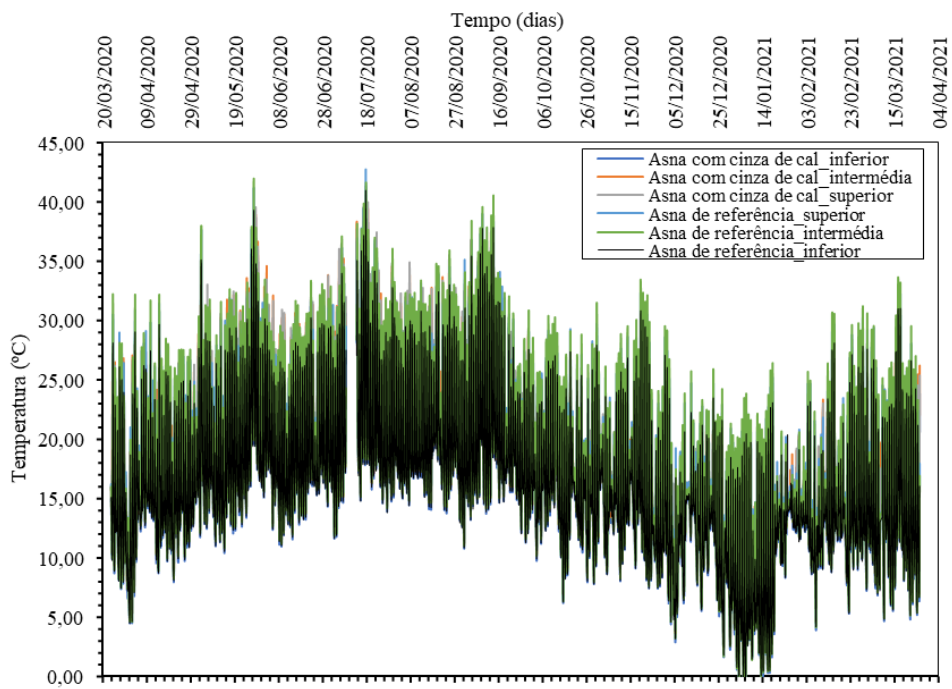
Após se ligar o sistema de aquisição nos pórticos (Figura 63b), a temperatura e humidade relativa do ar, e as temperaturas interna e externa das vigas foram registadas durante 1 ano de monitorização (Figura 65).



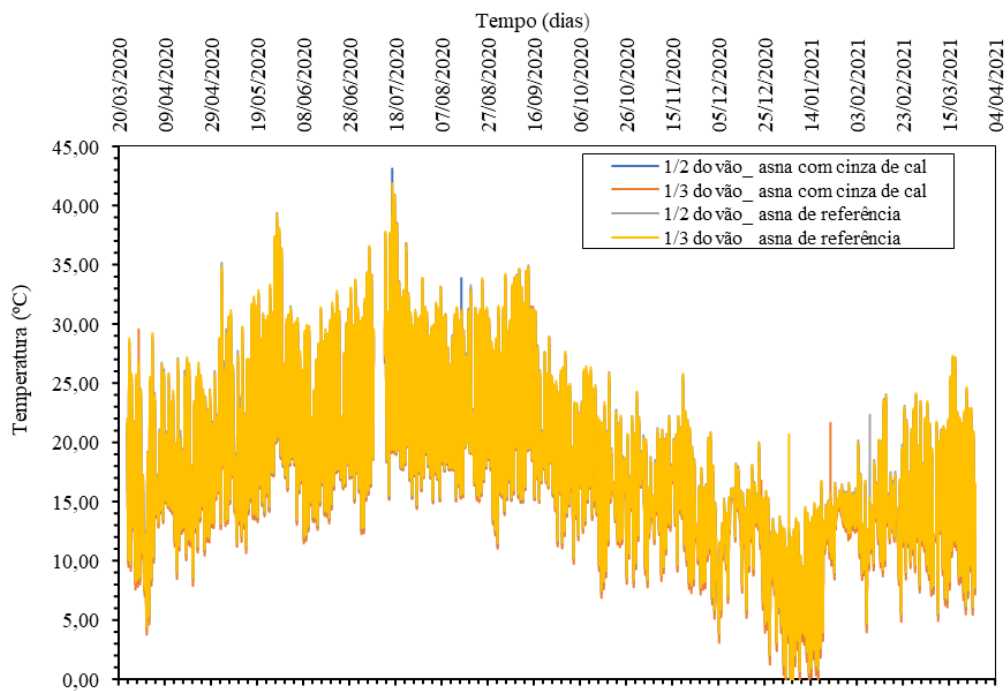
a) Temperatura do ar (sensor externo)



b) Humidade relativa (sensor externo)



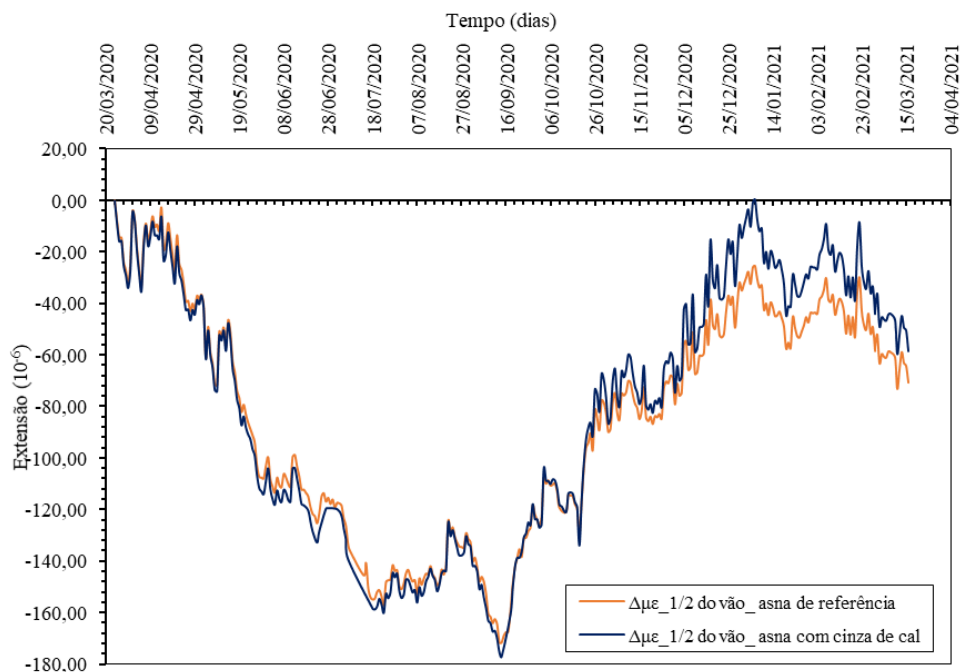
c) Temperatura (sensores exteriores)



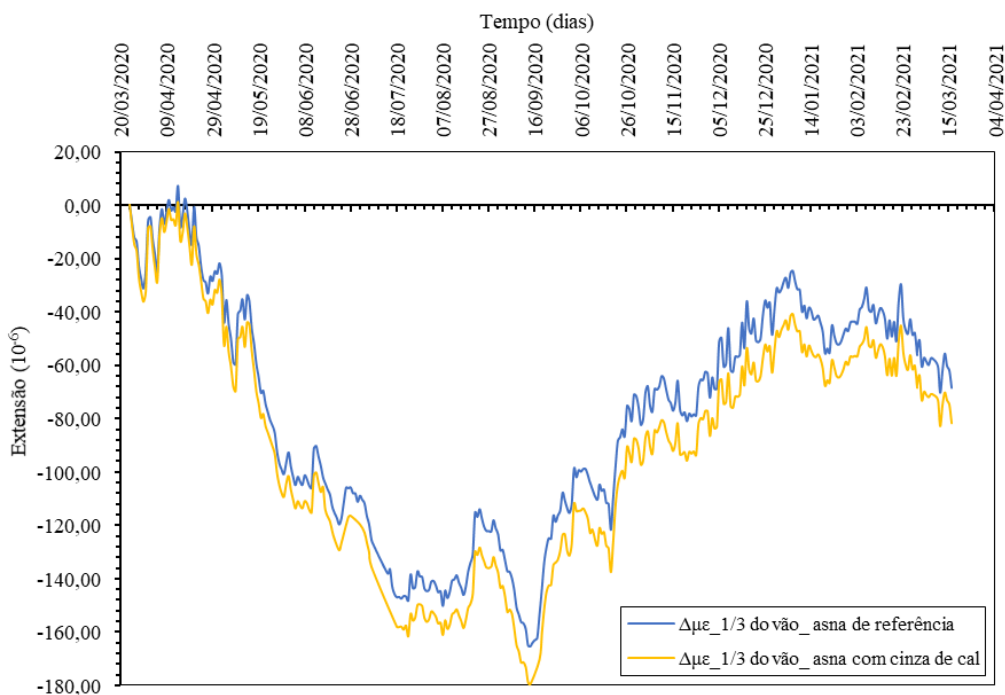
d) Temperatura (sensor interiores)

Figura 65. Resultados da monitorização de 1 ano na: a) temperatura do ar (sensor externo); b) humidade relativa (sensor externo); c) temperatura externa (sensor exterior) e temperatura interna (sensor embebido).

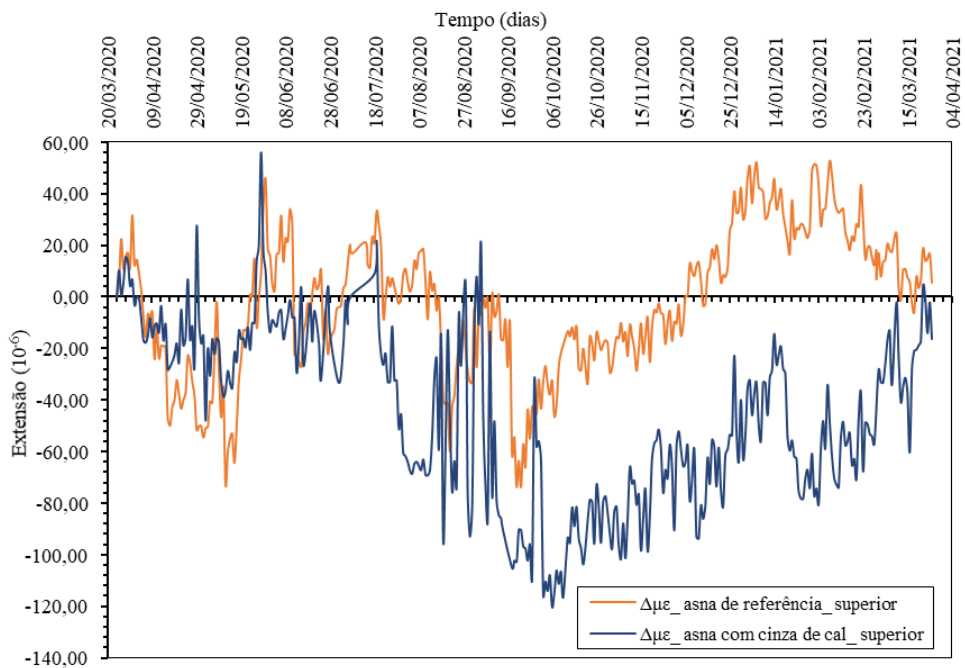
Após a montagem, a monitorização durante um ano mostrou que a temperatura foi muito semelhante para as vigas com cinza de cal e com o filler natural. Na Figura 66 mostra-se a deslocação longitudinal que o *data logger* registou após a montagem das vigas.



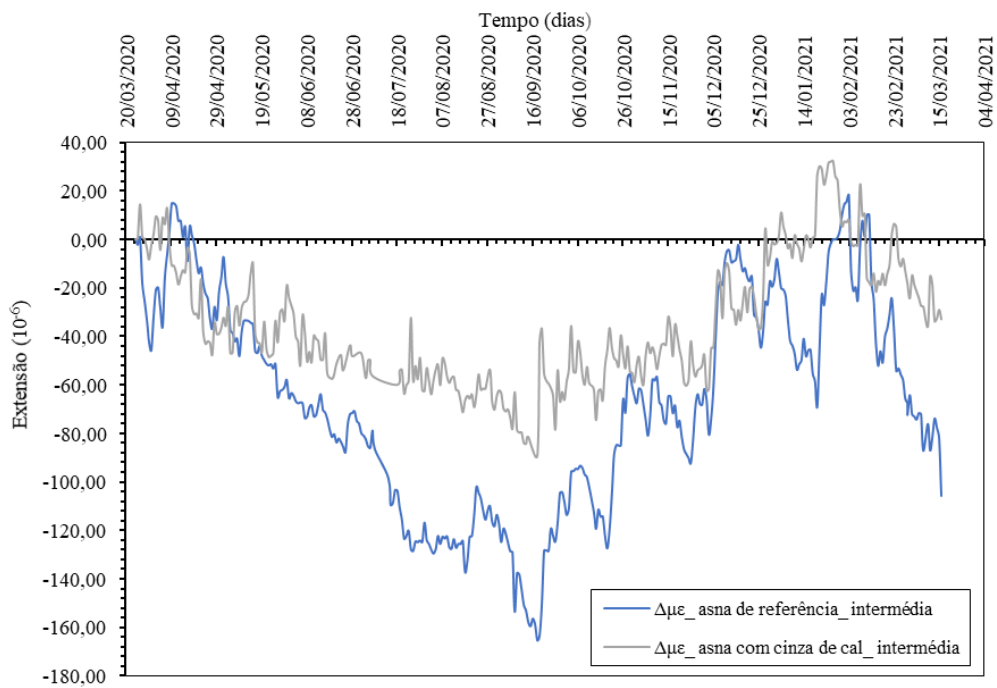
a) $\frac{1}{2}$ do vão da asna



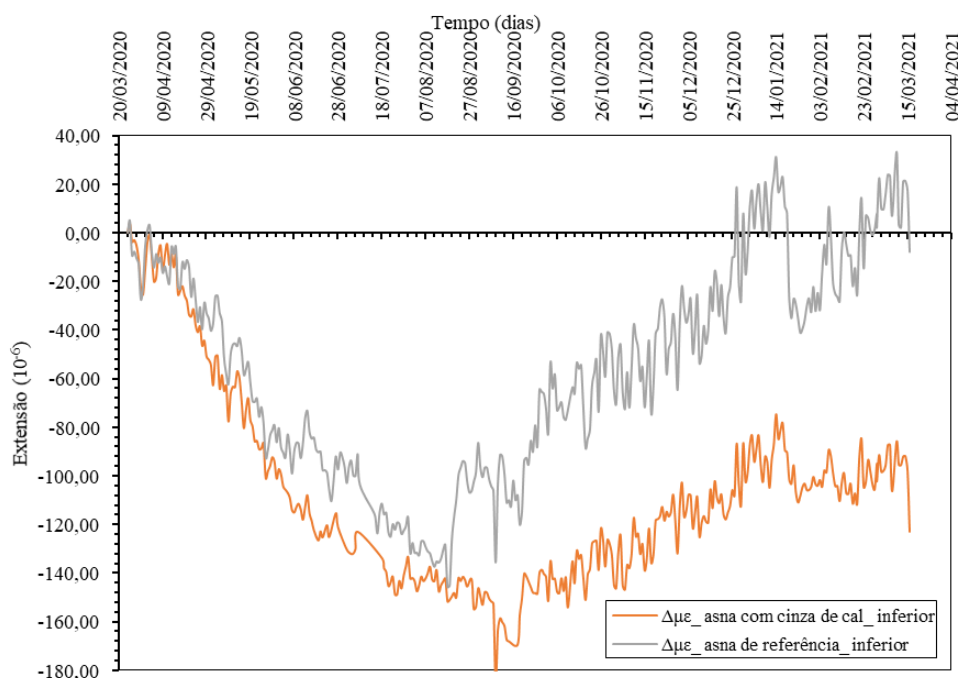
b) $\frac{1}{3}$ do vão da asna



c) Extensão do sensor superior



d) Extensão do sensor intermédio



e) Extensão do sensor inferior

Figura 66. Resultados da monitorização de 1 ano da deformação: a) 1/2 do vão; b) 1/3 do vão; c) sensor superior; d) sensor intermédio; e) sensor inferior.

Após a montagem, a extensão (ou deformação) que foi medida pelos sensores internos (Figura 66 a) e b)) é muito similar para ambas as asnas. Embora nos sensores externos (Figura 66 c), d) e e)), exista um desvio na extensão entre as asnas com e sem resíduo, tal pode ser explicado pela diferença na exposição solar. Adicionalmente, outros parâmetros técnicos (Figura 67) foram também estimados *in situ* através de métodos não destrutivos (PUNDIT e o Esclerómetro de *Schmidt*), nomeadamente, a resistência à compressão superficial e o módulo de elasticidade.



Esclerómetro *Schmidt*



PUNDIT

Figura 67. Estimativa da dureza superficial (RCS) e do módulo de elasticidade (E).

Na Tabela 57 mostra-se os valores estimados da resistência à compressão ou dureza superficial (RCS) e módulo de elasticidade para asnas de betão com cinza de cal e betão de referência.

Tabela 57. Resultados da resistência à compressão superficial e do módulo de elasticidade.

| Asna | RCS (Mpa) | UPV (Km/s) | E (Mpa) |
|------------------------|-----------|------------|---------|
| Betão de referência | 69 | 4,9 | 59,3 |
| Betão com cinza de cal | 64 | 5,0 | 58,6 |

Os resultados da Tabela 57, nomeadamente, a velocidade de ultrassons (UPV), mostraram que o betão é de excelente qualidade e que o betão com cinza de cal tem um desempenho similar ao betão com filler natural.

Finalmente, ao nível ambiental, foi efetuado um teste rápido para medir o pH do betão dos pilares. Este teste foi realizado após montagem dos pórticos e as condições climatéricas do local de instalação (temperatura e humidade) foram também monitorizadas. O pH da superfície do betão pré-fabricado com cinza de cal e com filler natural permaneceu em torno de 8-9, (Figura 68).



Figura 68. Medida de pH no betão pré-fabricado com cinza de cal e com filler natural.

Em resumo, a avaliação mostrou que a introdução do resíduo como filler alternativo no betão pré-fabricado não provocou alterações, mesmo a longo prazo, no desempenho técnico relativamente ao betão pré-fabricado com filler natural, garantindo que é uma substituição que se pode efetuar sem preocupações do ponto de vista da viabilidade técnica.

5.2.3. Análise da viabilidade técnica

O setor da construção envolve uma série de produtos que contém a marcação CE, ou seja, uma certificação que atesta que o produto apresenta determinado desempenho. Por exemplo, os agregados para betão pré-fabricado são harmonizados pela norma de produto EN 12620, bem como, o betão pré-fabricado dos elementos lineares é harmonizado pela norma de produto EN 13225. Estas normas de produto estabelecem um conjunto de propriedades que estão definidas no anexo nacional e devem ser analisadas de modo a se emitir uma declaração de desempenho (IPQ, 2015, 2004b).

Em relação ao filler natural comercializado em Portugal para betão, as declarações de desempenho dos produtores declaram sobretudo a densidade, a granulometria e a qualidade dos finos (Eurocálcio, 2021; Omya, 2020; sicalpor, 2022; VAC, 2018). Por outro lado, os produtores de betão pré-fabricado declaram principalmente a classe de resistência do betão, a qual depende se o produto pertence a produtos de betão armado ou pré-esforçado (Farcimar, 2017; SPRA1, 2022; Vigobloco, 2021).

Na Tabela 58 mostra-se o fuso granulométrico que o filler deve obedecer para ser incorporado na produção do betão. Além desta característica, a qualidade dos finos pelo ensaio do azul de metileno, deve ser inferior 2g/kg, de acordo com a especificação E467-guia para a utilização de agregados em betão (Ferreira *et al.*, 2020; IPQ, 2015).

Tabela 58. Requisito do Fuso granulométrico do filler natural (IPQ, 2004b)).

| Peneiro (mm) | Limite superior | Limite inferior |
|--------------|-----------------|-----------------|
| 2 | 100 | |
| 0,125 | 100 | 85 |
| 0,063 | 100 | 70 |

Tabela 59. Qualidade do betão baseada nos valores de UPV (Cunha, 2020).

| Qualidade do betão | UPV (Km/s) |
|--------------------|------------|
| Excelente | >4,5 |
| Bom | 3,6 a 4,5 |
| Regular | 3,0 a 3,6 |
| Má | 2,1 a 3,0 |
| Péssimo | <2,1 |

Ao nível do betão, a classe de resistência mínima do betão pré-fabricado é a de C20/25 e C30/37 para produtos de betão armado e de betão pré-esforçado, respetivamente (IPQ, 2015). Outra característica em avaliação é a velocidade de ultrassons (UPV) que tem gamas

que definem a qualidade do betão, como se pode ver na Tabela 59. No entanto, deve-se realçar que esta classificação é meramente indicativa e não vem descrita na norma harmonizada dos betões pré-fabricados.

Quando se incorpora resíduos nos produtos de construção, estes devem ser avaliados na vertente técnica (desempenho e qualidade), social e económica. Após a validação técnica, a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) pode ser usada para analisar o desempenho ambiental, social e económico e, os resultados das três vertentes devem gerar benefícios relativamente à solução tradicional (sem resíduos) (Colangelo *et al.*, 2018).

Relativamente à viabilidade técnica, a caracterização da cinza de cal (Figura 48 e Tabela 55) permitiu validar que este resíduo cumpre com o requisito da granulometria (Tabela 58) e da qualidade de finos (2g/kg) para um filler, respetivamente. A incorporação da cinza de cal no betão pré-fabricado, os resultados da resistência à compressão (Figura 54) cumprem com o requisito mínimo da classe de resistência da norma harmonizada (EN13225) para produtos armados e pré-fabricados, bem como, o requisito da classe de resistência do projeto (Tabela 51e Tabela 52). Outro controlo é a qualidade do betão, ou seja, se a velocidade medida pelo PUNDIT (Figura 56 a) e c)) está dentro de algum intervalo definido na Tabela 59. E, os resultados da velocidade dos ultrassons (Figura 56 a) e c)) mostram que os betões (com e sem resíduos) são de excelente qualidade. Deste modo, a incorporação da cinza de cal não altera o desempenho do betão para asnas e para pilares.

Além disso, durante as várias inspeções visuais realizadas sobre o caso de estudo, mostraram que os pórticos com cinza de cal têm a mesma aparência do pórtico de referência, ou seja, não apresentam nenhuma degradação que seja detetada visualmente. Além disso, os resultados dos ensaios realizados *in situ* (Tabela 57 e Figura 68), assim como, os resultados da monitorização pelos sensores (Figura 61, Figura 62, Figura 65 e Figura 66) demonstram que o betão com cinza de cal segue o mesmo comportamento do que o betão com filler natural.

Atingida a viabilidade técnica, os próximos etapas passam pela análise dos impactos ambientais gerados pelas novas soluções, bem como, dos custos de aquisição e produção, objeto do próximo capítulo 6. Além disso, a competitividade da nova solução é outro fator que deve ser avaliado relativamente à solução tradicional do ponto de vista do modelo de negócio circular o que será feito no capítulo 7.

5.2.4. Transição para a economia circular

O desenvolvimento económico, à escala global, tem contribuído para escassez de recursos e, ao mesmo tempo, a produção de resíduos e a emissão de gases de efeito estufa tem aumentado para níveis que comprometem a sustentabilidade do planeta (Fonseca *et al.*, 2018). Este crescimento tem seguido a lógica linear de uso de recursos no final, ou seja, os resíduos não são reutilizados, sendo frequentemente depositados em aterro (Ferreira *et al.*, 2019). Neste sentido, o modelo circular emergiu para tentar substituir este modelo de produção e consumo linear (Cavaleiro de Ferreira e Fuso-Nerini, 2019), onde o valor económico e ambiental dos produtos possam ser explorados por maior tempo possível e onde uma das estratégias passa pela substituição de materiais primários por materiais secundários (Nußholz *et al.*, 2019).

Deste modo, a incorporação de resíduos industriais pelos produtores de betão pode ser uma oportunidade e uma das vias para implementar a economia circular e, ao mesmo tempo ajudar a União Europeia atingir as suas metas na reciclagem de resíduos e na eficiência de recursos pois, de facto, é urgente que a sociedade encontre soluções para responder aos desafios da ação climática, da preservação do meio ambiente, eficiência de recursos e matérias-primas. (Costa e Marques, 2018).

No modelo linear da produção do betão são utilizados recursos naturais (britas, areias cimento e filler) que são incorporados diretamente na central de produção. Durante a implementação deste caso de estudo (Tabela 53), o resíduo foi incorporado diretamente na produção do betão sem pré-tratamento, porque o resíduo já que estava seco. Ou seja, o produtor do resíduo deve garantir que o resíduo cumpre o requisito granulométrico dum filler para betão e, ao mesmo tempo, o resíduo não pode estar húmido, caso contrário, isso impedirá a incorporação direta no silo de armazenamento do produtor de betão bem como a logística do transporte do filler (camião-cisterna).

Atualmente a cinza de cal é um resíduo, por isso, o transporte teve de ser assegurado por um operador de gestão de resíduos que estava autorizado a manusear a cinza de cal. Ou seja, o operador encontrado detinha uma licença para operar o resíduo com o código “LER 03 03 09 – resíduos das lamas de cal” e para a operação R12 “Troca de resíduos com vista a submetê-los a uma das operações de R1 a R12”, na sua licença. Assim, a implementação requereu um operador de gestão de resíduos habilitado para transportar a cinza de cal, desde que o resíduo estivesse seco.

Após o cumprimento técnico da solução circular, o produtor da cinza de cal deverá solicitar um processo de desclassificação do resíduo, de modo a obter esse estatuto e poder ser usado no setor da construção como matéria prima. Mesmo após a obtenção do estatuto, os novos produtos entram num processo de marcação CE, de modo a garantir a conformidade do produto.

Ao nível da produção, o setor português de pasta e papel produziu 2,729 milhões de pasta e papel, em 2016, das quais geraram cerca de 45 000 toneladas de lamas de cal (Nordlander *et al.*, 2018). Para este volume passar a cinza de cal, a humidade das lamas (aproximadamente 20%) deveria ser eliminada pelo produtor do resíduo (Marques, 2015). Esta conversão forneceria 36 000 t de cinza de cal que seria utilizada na produção de betão pré-fabricado e evitaria a extração de quantidade equivalente de filler natural. É de destacar que esta calcinação das lamas já é feita na própria instalação fabril da indústria de pasta e papel, no forno de cal para aproveitamento desta no processo de produção.

Contudo, outros aspetos, que serão tratados no capítulo 7, terão ainda de ser analisados, nomeadamente o custo de transporte e de aquisição, bem como, a distância média de transporte que garanta que o resíduo permanece competitivo como alternativa aos materiais naturais. Esta dependerá da disposição das unidades de produção de resíduos relativamente às de produção do betão, bem como, dos locais de extração dos recursos naturais, de modo a tornar a solução de substituição competitiva relativamente ao modelo linear (produção de betão pré-fabricado sem resíduos e com deposição dos resíduos em aterro).

Capítulo 6

Avaliação da sustentabilidade das operações de valorização de resíduos

6. Avaliação da sustentabilidade das operações de valorização de resíduos

Após a validação técnica dos dois casos de estudo, o próximo passo foi a avaliação da sustentabilidade nas suas dimensões social, ambiental e económica.

No primeiro subcapítulo (6.1), a avaliação da sustentabilidade centra-se primeiro no caso da produção e aplicação da mistura betuminosa (tipo AC 14 *surface*) no pavimento rodoviário, iniciando primeiro com a análise do modelo linear que serve de referência com a mistura sem resíduo, aliada à deposição dos resíduos em aterro pela indústria da celulose. De seguida, aborda-se a avaliação da sustentabilidade do modelo circular deste mesmo caso piloto, ou seja, sobre a produção e aplicação da mistura betuminosa com resíduos (*dregs* e *grits*) em pavimentos rodoviários.

No segundo subcapítulo (6.2) apresentam-se os resultados da avaliação da sustentabilidade na produção de betão pré-fabricado iniciando no modelo linear (do betão de referência sem resíduo e com a deposição da cinza de cal a ser feita em aterro) e comparando com a do modelo circular de produção de betão pré-fabricado com cinza de cal incorporada. Em ambos os casos piloto, apresentam-se os ganhos e perdas comparadas entre o modelo linear e o modelo circular desde a extração ou recolha de matérias primas até à construção e instalação final da estrada ou dos pórticos de betão, num processo de ACV do berço ao portão (*cradle to gate*) com alguns cenários extra, decorrentes da deposição em local das obras.

Ao avaliar estas três dimensões da sustentabilidade, nomeadamente, a social, a económica e a ambiental, através da metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), permite-nos avaliar o seu potencial e adequabilidade. Quando se aplica a perspetiva do ciclo de vida para avaliar um sistema (produto ou serviço), os avaliadores não consideram apenas o seu sistema, mas, também os sistemas a montante e a jusante. Ou seja, desde a extração de matérias-primas até ao fim de vida dos materiais que fazem parte do sistema, agrupadas em vários estágios ou etapas.

A avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que permite avaliar as três dimensões da sustentabilidade de uma forma ordenada. A aplicação desta ferramenta permite organizar a informação ambiental, económica e social e, ao mesmo tempo, analisar os três pilares da sustentabilidade entre si. Deste modo, fornece informações sobre os impactos das

várias fases de ciclo de vida dos produtos e serviços que contribuirão para a escolha de produtos e tecnologias mais sustentáveis (Ciroth *et al.*, 2011).

Nestes dois casos de estudo, as diretrizes definidas no relatório “*Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products*” foram consideradas (Ciroth *et al.*, 2011). Além disso, para cada uma das avaliações de ciclo de vida (na dimensão social, económica e ambiental) foram consideradas metodologias adicionais.

Relativamente à Avaliação de Ciclo de Vida Ambiental (e-ACV, *environmental life cycle analysis*) foram aplicadas as metodologias da norma ISO 14040:2006 (ISO/TC 207, 2006a), bem como, da norma ISO 14044:2006 (ISO/TC 207, 2006b). As categorias de impacto ambiental foram definidas de acordo com regras de categoria do produto do sistema internacional EPD para autoestradas, ruas e estradas para misturas betuminosas (International EPD System, 2018), nomeadamente, no que diz respeito às seguintes categorias de impacto ambiental:

- ✓ GWP 100: Aquecimento global, ou seja, emissão de gases de efeito de estufa (advém do somatório do potencial de aquecimento global, GWP, para 100 anos, em equivalentes de dióxido de carbono, CO₂ Eq);
- ✓ AP: Acidificação, ou seja, emissão de gases acidificantes (advém do somatório do potencial de acidificação em equivalentes de dióxido de enxofre, SO₂ Eq);
- ✓ EP: Eutrofização, ou seja, emissão de substâncias para água que contribuem para depleção do oxigénio (resulta do equivalente de iões fosfatos, PO₄⁻³ Eq)
- ✓ POFP: Formação de oxidantes fotoquímicos, ou seja, emissão de gases que contribuem para criação de ozono fotoquímico (advém do somatório do ozono fotoquímico em equivalentes de etileno, C₂H₄ Eq);
- ✓ ODP: Depleção de Ozono Estratosférico, ou seja, emissão de gases que diminuem a camada de ozono (advém do somatório do potencial de depleção de Ozono, ODP kg CFC¹¹ Eq);
- ✓ ADP: Depleção dos recursos abióticos não fósseis (resulta do potencial de depleção de recursos não fósseis (ADP-elementos), kg Sb Eq);
- ✓ ADP-FF: Depleção dos recursos abióticos fósseis (resulta do potencial de depleção de recursos fósseis (ADP combustíveis fósseis), MJ, valor calorífico líquido).

O modelo de caracterização e os fatores usados para calcular cada categoria de impacto ambiental foram aqueles desenvolvidos na metodologia CML-IA, publicada em 2013. Da mesma forma, outros dois impactos foram avaliados, nomeadamente;

- ✓ CED: Demanda ou necessidades de energia acumulada, MJ
- ✓ WU: Uso de água, m³

Seguidamente a avaliação de ciclo de vida para a dimensão económica resultou da análise dos Custos do Ciclo de Vida (LCC – *life cycle costing*). Esta metodologia permite avaliar os custos dum produto ou serviço durante o seu ciclo de vida. Neste caso, a metodologia seguida como referência foi a ISO 15686-5:2017 (ISO/TC 59, 2017). Deste modo, foi necessário recolher os seguintes dados:

- ✓ Custos de aquisição de materiais;
- ✓ Equipamento alugados, incluindo a mão de obra;
- ✓ Custos de transporte de materiais;
- ✓ Custos da energia consumida, neste caso, o custo do combustível consumido pelo equipamento utilizado nos trabalhos de produção.

Por fim, centrou -se na dimensão social, aplicando o método de Avaliação do Ciclo de Vida Social (s-ACV), sendo a metodologia adotada proveniente das diretrizes para a avaliação do ciclo de vida social dos produtos (Andrews *et al.*, 2009). Esta análise usou a informação recolhida para a avaliação de ciclo de vida na dimensão ambiental e económica, bem como, a mão de obra e o tempo de funcionamento.

6.1. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários

Antes do cálculo dos resultados para qualquer dos casos piloto para a dimensão social, económica e ambiental, é necessário definir a unidade funcional e os limites do sistema. Na Figura 69 mostra-se a fronteira do sistema linear e circular do caso de estudo relativo ao pavimento rodoviário.

No caso da solução linear, consideraram-se dois sistemas: o primeiro, a deposição dos *dregs* e dos *grits* em aterro e, o segundo, a produção e aplicação da mistura betuminosa usando agregados naturais. Enquanto, no caso circular, o agregado fino é substituído parcialmente por *dregs* e por *grits* na produção e aplicação das misturas betuminosas, evitando-se a deposição dos resíduos em aterro e a extração das matérias-primas naturais

que vão ser substituídas. O fim de vida de ambas as soluções não foram consideradas nos limites do sistema, devido à inexistência de diferenças entre as soluções finais, pois ambas poderão sofrer o mesmo processo de reciclagem para reaproveitamento dos materiais no seu fim de vida.

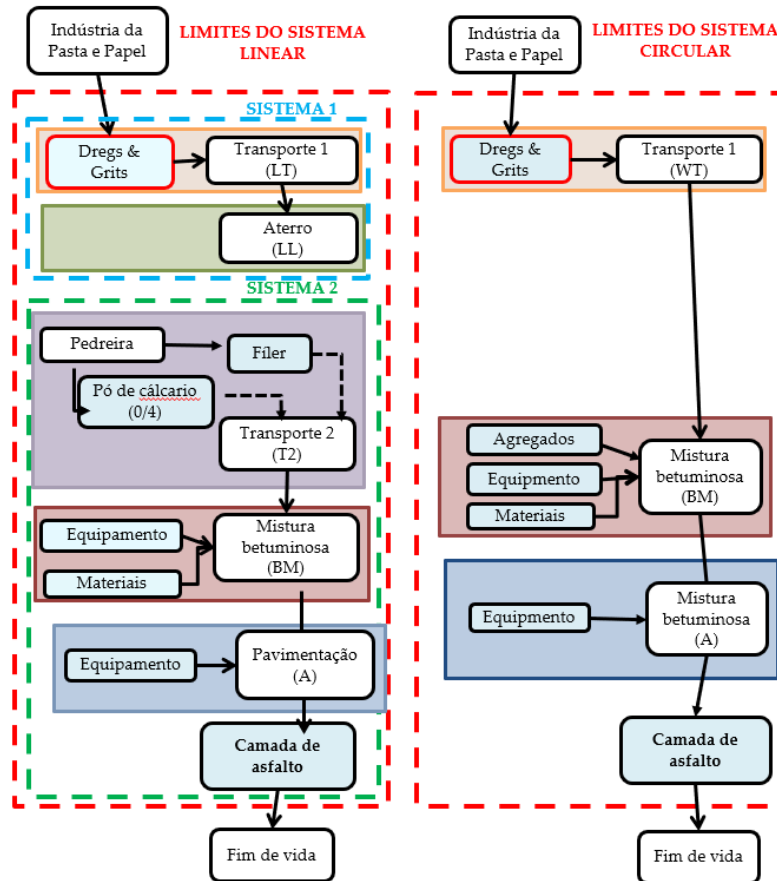


Figura 69. Processos, etapas e limites do sistema de produto das misturas betuminosas.

Além da definição dos limites do sistema linear e circular (ver Figura 69), a unidade funcional foi definida para este caso de estudo, de modo a que os resultados obtidos nas dimensões social, económica e ambiental foram referidos à produção de 1 m² de mistura betuminosa, considerando a aplicação numa camada de desgaste com 5 cm de espessura.

Relativamente ao procedimento de alocação, foi aplicado um modelo de sistema de corte e, conseqüentemente, os materiais recicláveis estão disponíveis sem encargos para os processos de reciclagem, e os materiais alternativos (reciclados) suportam apenas os impactos dos processos de reciclagem. Não foi utilizado qualquer outro procedimento de atribuição neste estudo.

6.1.1. Avaliação ambiental

A avaliação ambiental deste caso de estudo foi conduzida utilizando a ferramenta informática Simapro (v. 9.2.0.1) e os dados do inventário foram recolhidos durante a implementação do caso de estudo. Também foi usada uma base de dados da avaliação de ciclo de vida (Ecoinvent 3.4), de modo a suprimir a falta de resultados que se não conseguiu recolher, nomeadamente, a produção de energia e os materiais consumidos neste caso de estudo.

No modelo linear, os resíduos (*dregs* e *grits*) são transportados desde a unidade de produção de pasta e papel até ao aterro que estão separados por 1,5 km. De seguida, na etapa da deposição dos resíduos em aterro, os impactos desta atividade resultam dos trabalhos de escavação através de uma escavadora hidráulica (HD), do movimento do resíduo através da pá carregadora (SSL) e da própria deposição do resíduo em aterro.

Na Tabela 60 mostram-se os impactos gerados pela deposição dos resíduos (*dregs* e *grits*) em aterro, de acordo com a unidade funcional da aplicação da camada de desgaste (1m² de mistura betuminosa com 5 cm de espessura). A substituição parcial do agregado fino (pó de calcário 0/4mm) por matérias-primas alternativas (resíduos) usa 4,70 kg de resíduos por m². Contudo, os *dregs* e *grits* estão húmidos no momento da produção e deposição em aterro (Paiva *et al.*, 2019). Assim, a utilização de 4,70kg de resíduo na produção de cada mistura betuminosa no modelo circular, significa no modelo linear depositar 7,83kg de *dregs* e 5,63 kg de *grits* em aterro, que geram os impactos ambientais da Tabela 60.

Tabela 60. Impactos ambientais da deposição dos resíduos em aterro na produção linear da mistura betuminosa.

| Categoria | Unidade | Transporte (1,5km) | Escavação (HD) | Movimento dos resíduos (SSL) | Aterro |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 2,76×10 ⁻³ | 6,45×10 ⁻³ | 6,47×10 ⁻³ | 3,96×10 ⁻² |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | 5,16×10 ⁻¹⁰ | 1,22×10 ⁻⁹ | 1,21×10 ⁻⁹ | 6,13×10 ⁻⁹ |
| AP | kg SO ₂ eq | 9,75×10 ⁻⁶ | 5,02×10 ⁻⁵ | 5,02×10 ⁻⁵ | 2,92×10 ⁻⁴ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 1,90×10 ⁻⁶ | 1,11×10 ⁻⁵ | 1,12×10 ⁻⁵ | 1,39 |
| POFP | kg NMVOC | 1,35×10 ⁻⁵ | 9,33×10 ⁻⁵ | 9,34×10 ⁻⁵ | 4,87×10 ⁻⁴ |
| ADP | kg Sb eq | 6,30×10 ⁻¹² | 1,76×10 ⁻¹⁰ | 2,09×10 ⁻¹⁰ | 9,92×10 ⁻¹⁰ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 4,01×10 ⁻² | 9,43×10 ⁻² | 9,40×10 ⁻² | 5,34×10 ⁻¹ |
| WU | m ³ | 1,45×10 ⁻⁴ | 2,03×10 ⁻⁴ | 2,05×10 ⁻⁴ | 2,04×10 ⁻³ |
| CED | MJ | 4,28×10 ⁻² | 1,01×10 ⁻¹ | 1,01×10 ⁻¹ | 5,76×10 ⁻¹ |

Ainda relativamente à produção da mistura betuminosa sem resíduo (modelo linear), os impactos associados resultam também do uso das matérias-primas naturais (agregados), que se resumem na Tabela 61.

Além dos agregados, o transporte do agregado pó de calcário do produtor até à central de betuminoso (78 km), o betume e o combustível (nafta) produzem também impactes que devem ser adicionados aos impactes das várias frações granulométricas (brita, pó e filler) usadas na produção da mistura betuminosa. Na Tabela 62 mostram-se os impactes dos outros componentes utilizados na produção da mistura betuminosa. O betume é usado para ligar a mistura de agregados, enquanto a nafta é um combustível usado nas operações da central de betuminoso, nomeadamente na secagem e no aquecimento das diferentes matérias-primas, de modo a se produzir a mistura betuminosa a quente (BEES, 2011; Martinho *et al.*, 2018; Peng *et al.*, 2015; Thives e Ghisi, 2017).

Tabela 61. Resultados dos impactos ambientais dos agregados na produção da mistura betuminosa.

| Categoria | Unidade | Brita granítica (6/14mm) | Pó de granito (0/5mm) | Pó de calcário (0/4mm) | Filler natural |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $3,84 \times 10^{-1}$ | $7,03 \times 10^{-2}$ | $6,82 \times 10^{-2}$ | $9,04 \times 10^{-1}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $4,19 \times 10^{-8}$ | $7,66 \times 10^{-9}$ | $9,75 \times 10^{-9}$ | $9,84 \times 10^{-8}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $2,13 \times 10^{-3}$ | $3,90 \times 10^{-4}$ | $9,85 \times 10^{-4}$ | $5,01 \times 10^{-3}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $5,64 \times 10^{-4}$ | $1,03 \times 10^{-4}$ | $2,37 \times 10^{-4}$ | $1,32 \times 10^{-3}$ |
| POFP | kg NMVOC | $2,12 \times 10^{-3}$ | $3,88 \times 10^{-4}$ | $1,53 \times 10^{-3}$ | $4,98 \times 10^{-3}$ |
| ADP | kg Sb eq | $3,96 \times 10^{-8}$ | $7,23 \times 10^{-9}$ | $7,40 \times 10^{-9}$ | $9,30 \times 10^{-8}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 4,68 | $8,55 \times 10^{-1}$ | $8,68 \times 10^{-1}$ | $1,10 \times 10^1$ |
| WU | m ³ | $3,80 \times 10^{-1}$ | $6,94 \times 10^{-2}$ | $9,26 \times 10^{-2}$ | $8,92 \times 10^{-1}$ |
| CED | MJ | 5,65 | 1,03 | $9,80 \times 10^{-1}$ | $1,33 \times 10^1$ |

Tabela 62. Resultados dos impactos ambientais do betume, do transporte do filler natural e da nafta usada na central betuminosa.

| Categoria | Unidade | Betume | Transporte do filler natural (78km) | Nafta |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 2,59 | $1,43 \times 10^{-1}$ | $2,26 \times 10^{-1}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $3,64 \times 10^{-6}$ | $2,62 \times 10^{-8}$ | $4,00 \times 10^{-7}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $2,44 \times 10^{-2}$ | $4,86 \times 10^{-4}$ | $2,89 \times 10^{-3}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $3,13 \times 10^{-3}$ | $9,39 \times 10^{-5}$ | $3,37 \times 10^{-4}$ |
| POFP | kg NMVOC | $2,37 \times 10^{-2}$ | $6,66 \times 10^{-4}$ | $1,52 \times 10^{-3}$ |
| ADP | kg Sb eq | $1,39 \times 10^{-7}$ | $3,20 \times 10^{-10}$ | $4,43 \times 10^{-8}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | $2,84 \times 10^2$ | 2,03 | $3,09 \times 10^1$ |
| WU | m ³ | $8,02 \times 10^{-1}$ | $7,37 \times 10^{-3}$ | $6,48 \times 10^{-2}$ |
| CED | MJ | $3,10 \times 10^2$ | 2,17 | $3,31 \times 10^1$ |

Após a produção na central, a mistura betuminosa é aplicada na estrada para produzir a camada de desgaste e são utilizados três equipamentos (pavimentadora, cilindro de pneus e cilindro vibratório tandem) que consomem energia (diesel) (Cao *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2019). Deste modo, na Tabela 63 apresentam-se os impactos associados ao consumo da energia dos equipamentos usados na aplicação da camada de desgaste.

Tabela 63. Resultados dos impactos ambientais dos equipamentos usados nos trabalhos de pavimentação da camada de desgaste.

| Categoria | Unidade | Pavimentadora | Cilindro de pneus | Cilindro vibratório tandem |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $4,19 \times 10^{-1}$ | $2,32 \times 10^{-1}$ | $1,64 \times 10^{-1}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $7,90 \times 10^{-8}$ | $4,37 \times 10^{-8}$ | $3,09 \times 10^{-8}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $3,27 \times 10^{-3}$ | $1,81 \times 10^{-3}$ | $1,28 \times 10^{-3}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $7,23 \times 10^{-4}$ | $4,00 \times 10^{-4}$ | $2,83 \times 10^{-4}$ |
| POFP | kg NMVOC | $6,06 \times 10^{-3}$ | $3,36 \times 10^{-3}$ | $2,37 \times 10^{-3}$ |
| ADP | kg Sb eq | $1,30 \times 10^{-8}$ | $7,17 \times 10^{-9}$ | $5,08 \times 10^{-9}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 6,15 | 3,40 | 2,41 |
| WU | m ³ | $2,48 \times 10^{-2}$ | $1,37 \times 10^{-2}$ | $9,69 \times 10^{-3}$ |
| CED | MJ | 6,57 | 3,63 | 2,57 |

Os impactos da produção e aplicação da mistura betuminosa (Tabela 61, Tabela 62 e Tabela 63) resultam principalmente do uso do ligante (betume), exceto na categoria uso de água (WU – *water use*) que advém da utilização do filler comercial. O betume contribui entre 39 e 83% para os impactos ambientais da produção e aplicação da mistura betuminosa, nas categorias do aquecimento global (GWP100a), da Depleção de Ozono Estratosférico (ODP), da acidificação (AP), da formação de oxidantes fotoquímicos (POFP), da eutrofização (EP), da depleção dos recursos abióticos não fósseis (ADP-elementos), da depleção dos recursos abióticos fósseis (ADP-FF) e da demanda de energia cumulativa (CED). Esta contribuição resulta do processo de produção do betume, ou seja, durante o processo de refinação existe queima de gás e da matéria-prima (crude) que tem altos teores de enxofre (Eurobitume, 2019; Ferreira *et al.*, 2016; Martinho *et al.*, 2018). Por outro lado acresce, no caso do filler natural, que este contribui aproximadamente com 38% do impacto do uso da água (WU), devido ao consumo de água na etapa de trituração das rochas durante a produção do filler (Oreto *et al.*, 2021).

Os impactos do modelo linear resultam assim do somatório dos impactos da produção e aplicação da mistura betuminosa de referência aliada à deposição dos resíduos em aterro. Deste modo, na Tabela 64 apresentam-se os impactos globais do modelo linear e verifica-se

que estes resultam maioritariamente da produção e aplicação da mistura betuminosa, exceto na categoria de Eutrofização (EP) que advém principalmente da deposição dos *dregs* e dos *grits* em aterro.

Tabela 64. Resultados dos impactos ambientais do modelo linear (deposição do resíduo em aterro, produção e aplicação da mistura betuminosa de referência).

| Categoria | Unidade | Aterro | Mistura betuminosa referência (produção) | Aplicação da mistura betuminosa | Impactos totais do modelo linear |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|---------------------------------|----------------------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 5,53×10 ⁻² | 4,39 | 8,16×10 ⁻¹ | 5,26 |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | 9,07×10 ⁻⁹ | 4,23×10 ⁻⁶ | 1,54×10 ⁻⁷ | 4,39×10 ⁻⁶ |
| AP | kg SO ₂ eq | 4,02×10 ⁻⁴ | 3,63×10 ⁻² | 6,36×10 ⁻³ | 4,31×10 ⁻² |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 1,39 | 5,79×10 ⁻³ | 1,41×10 ⁻³ | 1,40 |
| POFP | kg NMVOC | 6,87×10 ⁻⁴ | 3,49×10 ⁻² | 1,18×10 ⁻² | 4,74×10 ⁻² |
| ADP | kg Sb eq | 1,38×10 ⁻⁹ | 3,30×10 ⁻⁷ | 2,52×10 ⁻⁸ | 3,57×10 ⁻⁷ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 7,63×10 ⁻¹ | 3,35×10 ² | 1,20×10 ¹ | 3,48×10 ² |
| WU | m ³ | 2,59×10 ⁻³ | 2,31 | 4,82×10 ⁻² | 2,36 |
| CED | MJ | 8,20×10 ⁻¹ | 3,66×10 ² | 1,28×10 ¹ | 3,80×10 ² |

No sentido de alterar os impactos gerados pelo modelo linear, foi testado um modelo circular, onde os resíduos da indústria de pasta e papel, *dregs* e os *grits*, são usados como matérias-primas alternativas na produção de misturas betuminosas (AC 14 *surface*). Deste modo, os impactos resultantes das operações da deposição dos resíduos em aterro (Tabela 60) deixam de existir no modelo circular, porque esta operação já não ocorre. Contudo, os resíduos requerem um conjunto de operações de pré-tratamento, realizado por um operador de gestão de resíduos, que devem ser agora consideradas.

Assim, os impactos do pré-tratamento dos *dregs* provém do transporte do resíduo do produtor até ao operador de gestão de resíduos (34 km), da eletricidade utilizada no equipamento de secagem da estufa solar, da operação da unidade de crivagem e da utilização de combustível (diesel) nos equipamentos (pá carregadora e telescópica para embalamento do produto final). Na Tabela 65 apresentam-se os impactos gerados no pré-tratamento dos *dregs*.

Por outro lado, o pré-tratamento do *grits* deriva das mesmas operações dos *dregs*, exceto na operação da crivagem que não é necessária. Na Tabela 66 apresentam-se os impactos das operações de pré-tratamento dos *grits* (transporte e secagem), com diferenças relativamente às operações realizadas nos *dregs*. Além destes impactos, a operação de pré-tratamento dos *grits* junta ainda os impactos das operações da pá carregadora e da telescópica (Tabela 65)

que foram contabilizados na operação do pré-tratamento dos *dregs*, devido à utilização comum destes equipamentos.

Tabela 65. Resultados dos impactos ambientais do pré-tratamento dos *dregs* no operador de gestão de resíduos.

| Categoria | Unidade | Transporte dos <i>Dregs</i> (34km) | Estufa Solar | Unidade de crivagem | Pá carregadora | Telescópica |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $1,62 \times 10^{-2}$ | $4,52 \times 10^{-4}$ | $2,51 \times 10^{-2}$ | $4,55 \times 10^{-2}$ | $3,59 \times 10^{-2}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $2,98 \times 10^{-9}$ | $1,50 \times 10^{-11}$ | $8,32 \times 10^{-10}$ | $8,58 \times 10^{-9}$ | $6,76 \times 10^{-9}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $5,53 \times 10^{-5}$ | $3,48 \times 10^{-6}$ | $1,93 \times 10^{-4}$ | $3,55 \times 10^{-4}$ | $2,80 \times 10^{-4}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $1,07 \times 10^{-5}$ | $5,92 \times 10^{-7}$ | $3,29 \times 10^{-5}$ | $7,85 \times 10^{-5}$ | $6,18 \times 10^{-5}$ |
| POFP | kg NMVOC | $7,58 \times 10^{-5}$ | $1,35 \times 10^{-6}$ | $7,50 \times 10^{-5}$ | $6,59 \times 10^{-4}$ | $5,19 \times 10^{-4}$ |
| ADP | kg Sb eq | $3,64 \times 10^{-11}$ | $4,41 \times 10^{-12}$ | $2,45 \times 10^{-10}$ | $1,41 \times 10^{-9}$ | $1,11 \times 10^{-9}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | $2,32 \times 10^{-1}$ | $4,20 \times 10^{-3}$ | $2,33 \times 10^{-1}$ | $6,68 \times 10^{-1}$ | $5,26 \times 10^{-1}$ |
| WU | m ³ | $8,39 \times 10^{-4}$ | $2,64 \times 10^{-4}$ | $1,47 \times 10^{-2}$ | $2,69 \times 10^{-3}$ | $2,12 \times 10^{-3}$ |
| CED | MJ | $2,47 \times 10^{-1}$ | $8,64 \times 10^{-3}$ | $4,80 \times 10^{-1}$ | $7,13 \times 10^{-1}$ | $5,62 \times 10^{-1}$ |

Tabela 66. Resultados dos impactos ambientais do pré-tratamento dos *grits* no operador de gestão de resíduos.

| Categoria | Unidade | Transporte dos <i>grits</i> (34km) | Estufa solar |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $1,36 \times 10^{-2}$ | $1,89 \times 10^{-4}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $2,50 \times 10^{-9}$ | $6,27 \times 10^{-12}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $4,64 \times 10^{-5}$ | $1,46 \times 10^{-6}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $8,96 \times 10^{-6}$ | $2,48 \times 10^{-7}$ |
| POFP | kg NMVOC | $6,36 \times 10^{-5}$ | $5,66 \times 10^{-7}$ |
| ADP | kg Sb eq | $3,05 \times 10^{-11}$ | $1,85 \times 10^{-12}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | $1,94 \times 10^{-1}$ | $1,76 \times 10^{-3}$ |
| WU | m ³ | $7,04 \times 10^{-4}$ | $1,11 \times 10^{-4}$ |
| CED | MJ | $2,07 \times 10^{-1}$ | $3,62 \times 10^{-3}$ |

A divergência nas operações do transporte e estufa solar dos *dregs* e dos *grits* (Tabela 65 e Tabela 66) resulta da diferença do teor de humidade destes resíduos, ou seja, os *dregs* são mais húmidos do que os *grits* (Paiva *et al.*, 2019). Por isso, o transporte dos *dregs* até ao operador de gestão de resíduos consome mais diesel para se transportar a mesma quantidade de resíduo na base seca. Além disso, o período de secagem dos *dregs* é maior do que o período dos *grits* e, conseqüentemente consome mais eletricidade no equipamento de movimentação ao longo da estufa de secagem solar usada.

Após o pré-tratamento dos resíduos, os *dregs* e os *grits* são transportados do operador de gestão de resíduos até à central da mistura betuminosa (30 km), que gera os impactos expostos na Tabela 67, junto com os impactos do filler comercial, do pó de granito (0/5), do

pó de calcário (0/4) e da brita (6/14). Estas matérias-primas irão produzir a mistura betuminosa com os *dregs* e com os *grits*, onde estes resíduos substituem parcialmente o pó de calcário (0/4) no modelo circular de produção.

Tabela 67. Resultados dos impactos ambientais dos agregados na produção da mistura betuminosa com *dregs* e com *grits*.

| Categoria | Unidade | Transporte desde WM até central (30km) | Filler natural | Brita granítica (6/14mm) | Pó de calcário (0/4mm) | Pó de granito (0/5mm) |
|----------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $1,00 \times 10^{-2}$ | $9,04 \times 10^{-1}$ | $3,84 \times 10^{-1}$ | $5,57 \times 10^{-2}$ | $7,03 \times 10^{-2}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $1,84 \times 10^{-9}$ | $9,84 \times 10^{-8}$ | $4,19 \times 10^{-8}$ | $7,97 \times 10^{-9}$ | $7,66 \times 10^{-9}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $3,42 \times 10^{-5}$ | $5,01 \times 10^{-3}$ | $2,13 \times 10^{-3}$ | $8,05 \times 10^{-4}$ | $3,90 \times 10^{-4}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $6,60 \times 10^{-6}$ | $1,32 \times 10^{-3}$ | $5,64 \times 10^{-4}$ | $1,94 \times 10^{-4}$ | $1,03 \times 10^{-4}$ |
| POFP | kg NMVOC | $4,68 \times 10^{-5}$ | $4,98 \times 10^{-3}$ | $2,12 \times 10^{-3}$ | $1,25 \times 10^{-3}$ | $3,88 \times 10^{-4}$ |
| ADP | kg Sb eq | $2,25 \times 10^{-11}$ | $9,30 \times 10^{-8}$ | $3,96 \times 10^{-8}$ | $6,05 \times 10^{-9}$ | $7,23 \times 10^{-9}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | $1,43 \times 10^{-1}$ | $1,10 \times 10^1$ | 4,68 | $7,09 \times 10^{-1}$ | $8,55 \times 10^{-1}$ |
| WU | m ³ | $5,18 \times 10^{-4}$ | $8,92 \times 10^{-1}$ | $3,80 \times 10^{-1}$ | $7,56 \times 10^{-2}$ | $6,94 \times 10^{-2}$ |
| CED | MJ | $1,53 \times 10^{-1}$ | $1,33 \times 10^1$ | 5,65 | $8,00 \times 10^{-1}$ | 1,03 |

No modelo circular, os impactos do uso do betume e do combustível (nafta) (na Tabela 62) e dos equipamentos usados nos trabalhos de pavimentação da camada de desgaste (na Tabela 63) são os mesmos impactos do modelo linear. No caso do filler natural, este contribui aproximadamente com 38% do impacto do uso da água (WU), devido ao consumo de água na etapa da sua trituração da rocha e sua crivagem, que é aplicada na fase de extração e produção do agregado (Estanqueiro *et al.*, 2018; Pradhan *et al.*, 2019).

Mesmo em pequeno teor (4%), o pó de calcário é substituído parcialmente por *dregs* ou *grits* e a restante composição (brita, pó de granito (0/5), filler e betume) da mistura betuminosa mantém-se igual à composição da mistura betuminosa do modelo linear (Tabela 33). Deste modo, as diferenças aparecem no impacto do pó de calcário e do seu transporte, ou seja, a incorporação e transporte dos resíduos permitiu reduzir em 18% e 93% os impactos face à solução linear com o pó de calcário e o seu transporte, respetivamente. Esta redução de impactos no transporte é devida à diminuição da distância de transporte entre o caso do pó de calcário e o dos resíduos (de 78km to 30km).

Por outro lado, se comparar o pré-tratamento dos resíduos da solução circular (Tabela 65 e Tabela 66) e a deposição dos resíduos em aterro (Tabela 64), verifica-se que o pré-tratamento da solução circular produz *de per se* mais impactos do que a deposição dos resíduos em aterro (solução linear), exceto na categoria de eutrofização. A variação nas

restantes categorias é de 48% ou 87% e de 41% ou 54% para *dregs* ou *grits*, respetivamente. Esta diferença na variação é explicada pelo consumo prologado de recursos energéticos para secar os *dregs*, de modo a eliminar a sua humidade inicial (50% para *dregs* e 16% para *grits*). Além disso, é necessário utilizar um equipamento de peneiração para se produzir um agregado em condições semelhantes à matéria-prima tradicional. Na Tabela 68 e Tabela 69 mostram-se os impactos associados ao pré-tratamento, bem como, os impactos da produção e de aplicação da mistura betuminosa, com *dregs* ou *grits* incorporados, respetivamente.

Tabela 68. Resultados dos impactos ambientais da solução circular dos *dregs* (pré-tratamento dos resíduos, produção e aplicação da mistura betuminosa).

| Categoria | Unidade | Pré-tratamento <i>dregs</i> | Produção da mistura betuminosa (<i>dregs</i>) | Aplicação da mistura betuminosa (<i>dregs</i>) | Impactos totais da solução circular | Redução dos impactos (solução circular) |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---|--|-------------------------------------|---|
| GWP | kg CO ₂ eq | $1,23 \times 10^{-1}$ | 4,24 | $8,16 \times 10^{-1}$ | 5,18 | 1,5% |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $1,92 \times 10^{-8}$ | $4,20 \times 10^{-6}$ | $1,54 \times 10^{-7}$ | $4,37 \times 10^{-6}$ | 0,4% |
| AP | kg SO ₂ eq | $8,87 \times 10^{-4}$ | $3,57 \times 10^{-2}$ | $6,36 \times 10^{-3}$ | $4,29 \times 10^{-2}$ | 0,3% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $1,84 \times 10^{-4}$ | $5,66 \times 10^{-3}$ | $1,41 \times 10^{-3}$ | $7,25 \times 10^{-3}$ | 99,5% |
| POFP | kg NMVOC | $1,33 \times 10^{-3}$ | $3,40 \times 10^{-2}$ | $1,18 \times 10^{-2}$ | $4,71 \times 10^{-2}$ | 0,5% |
| ADP | kg Sb eq | $2,80 \times 10^{-9}$ | $3,29 \times 10^{-7}$ | $2,52 \times 10^{-8}$ | $3,57 \times 10^{-7}$ | 0,1% |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 1,66 | $3,33 \times 10^2$ | $1,20 \times 10^1$ | $3,46 \times 10^2$ | 0,3% |
| WU | m ³ | $2,06 \times 10^{-02}$ | 2,28 | $4,82 \times 10^{-2}$ | 2,35 | 0,2% |
| CED | MJ | 2,01 | $3,64 \times 10^2$ | $1,28 \times 10^1$ | $3,79 \times 10^2$ | 0,3% |

Tabela 69. Resultados dos impactos ambientais da solução circular dos *grits* (pré-tratamento dos resíduos, produção e aplicação da mistura betuminosa).

| Categoria | Unidade | Pré-tratamento <i>grits</i> | Produção da mistura betuminosa (<i>grits</i>) | Aplicação da mistura betuminosa (<i>grits</i>) | Impactos totais da solução circular | Redução dos impactos com solução circular |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---|--|-------------------------------------|---|
| GWP | kg CO ₂ eq | $9,52 \times 10^{-2}$ | 4,24 | $8,16 \times 10^{-1}$ | 5,15 | 2,0% |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $1,78 \times 10^{-8}$ | $4,20 \times 10^{-6}$ | $1,54 \times 10^{-7}$ | $4,37 \times 10^{-6}$ | 0,4% |
| AP | kg SO ₂ eq | $6,83 \times 10^{-4}$ | $3,57 \times 10^{-2}$ | $6,36 \times 10^{-3}$ | $4,27 \times 10^{-2}$ | 0,8% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $1,50 \times 10^{-4}$ | $5,66 \times 10^{-3}$ | $1,41 \times 10^{-3}$ | $7,21 \times 10^{-3}$ | 99,5% |
| POFP | kg NMVOC | $1,24 \times 10^{-3}$ | $3,40 \times 10^{-2}$ | $1,18 \times 10^{-2}$ | $4,70 \times 10^{-2}$ | 0,7% |
| ADP | kg Sb eq | $2,55 \times 10^{-9}$ | $3,29 \times 10^{-7}$ | $2,52 \times 10^{-8}$ | $3,56 \times 10^{-7}$ | 0,1% |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 1,39 | $3,33 \times 10^2$ | $1,20 \times 10^1$ | $3,46 \times 10^2$ | 0,4% |
| WU | m ³ | $5,62 \times 10^{-3}$ | 2,28 | $4,82 \times 10^{-2}$ | 2,34 | 0,9% |
| CED | MJ | 1,49 | $3,64 \times 10^2$ | $1,28 \times 10^1$ | $3,78 \times 10^2$ | 0,4% |

A diferença dos impactos da solução linear e da solução circular da camada de desgaste é conseguida pela eliminação parcial dos impactos associados à utilização do pó de calcário,

visto que o impacto no transporte da matéria-prima alternativa (*dregs* e *grits*) relativamente ao pó de calcário acabam por equilibrar os impactos produzidos no pré-tratamento dos resíduos.

Adotando a solução do modelo circular, esta permite reduzir entre 0,1% e 2% dos impactos face à solução linear (Tabela 68, Tabela 69 e Figura 70), exceto na categoria da eutrofização (EP), onde a redução é muito elevada (cerca de 99.5%), devido, principalmente, à eliminação das operações da deposição do resíduo em aterro (Tabela 60).

Na Figura 70 mostra-se de forma integrada e comparativa os resultados do modelo linear e modelo circular. A redução dos impactos no modelo circular só não é maior porque a taxa de incorporação parcial dos *dregs* e *grits* como agregado fino é baixa (4,0% da mistura de agregados), e, além disso, os resíduos estão sujeitos a operações de pré-tratamento (transporte, secagem, peneiração). Todavia, é de realçar que os resultados apontam uma tendência clara de diminuição em todos os parâmetros, mesmo com um teor de substituição tão pequeno e único. Os impactos do betume são mais elevados relativamente às outras matérias-primas tradicionais (britas, pó de calcário, pó de granito e filler) (Eurobitume, 2019; Ferreira *et al.*, 2016). Assim, o uso de outros resíduos como matérias-primas alternativas relativamente aos outros componentes deve ser explorado, de modo a minimizar ainda mais os impactos, mas mantendo sempre o desempenho técnico para que a solução circular se mantenha competitiva em relação à solução linear atual.

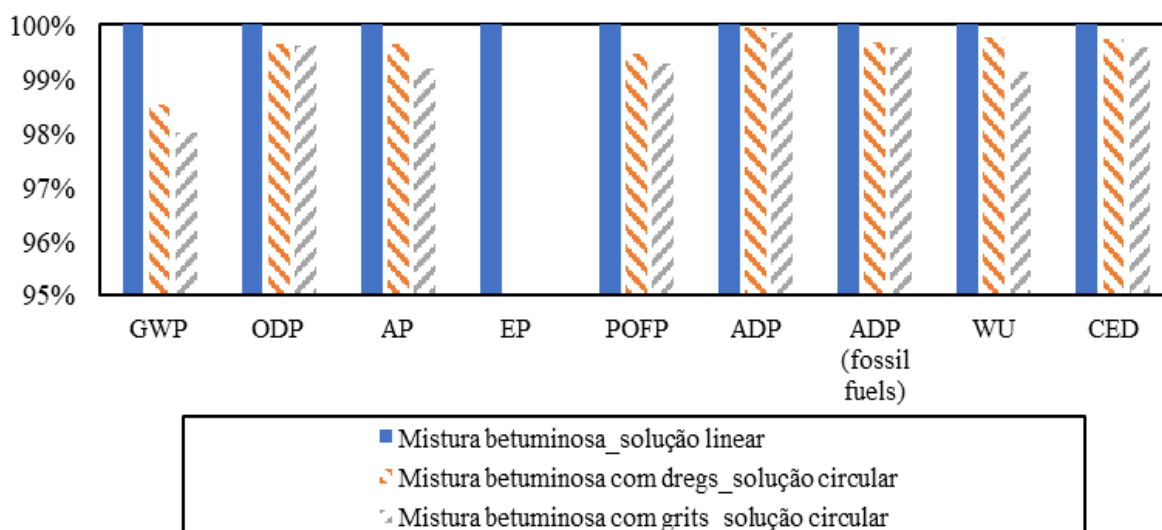


Figura 70. Impactos ambientais atingidos pela solução circular.

6.1.2. Avaliação económica

A operação principal do modelo linear e circular centra-se na produção e aplicação da mistura betuminosa, mas, existem as operações da deposição dos resíduos (*dregs* e *grits*) e as operações de transformação (modelo circular), nomeadamente o transporte dos resíduos até ao operador de gestão de resíduos, secagem, peneiração e transporte da matéria-prima até à central de betuminoso. Na Figura 71 apresentam-se os custos de operação reunidos para os modelos linear ou circular. Estes foram calculados de acordo com os dados recolhidos na implementação do caso de estudo junto dos vários intervenientes do processo.

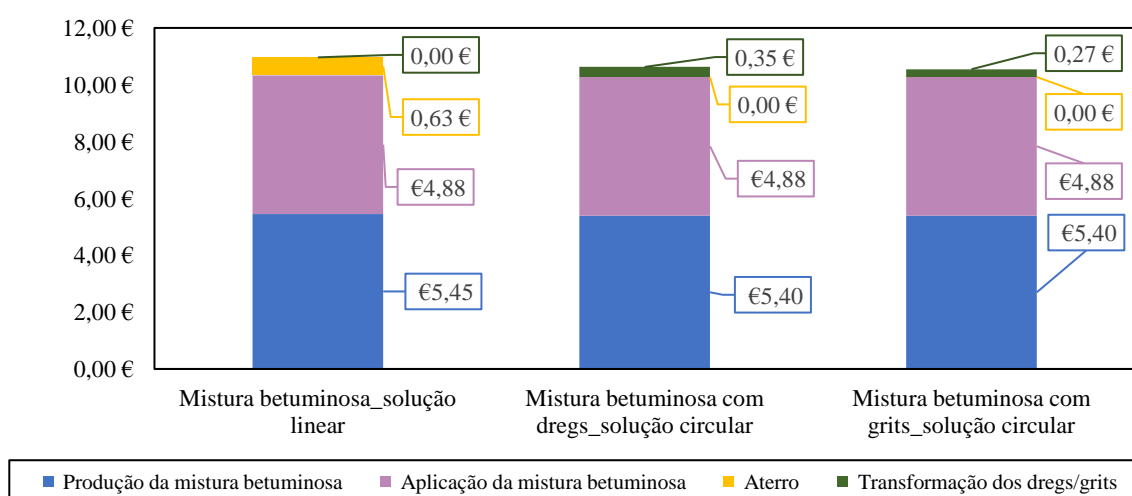


Figura 71. Custos por operação do modelo linear e circular das misturas betuminosas por m² de mistura betuminosa com 5 cm de espessura.

O uso dos *dregs* ou *grits* na produção da mistura betuminosa gera uma poupança (0,06€), devido à eliminação parcial do custo de aquisição do pó de calcário (0/4) pelo produtor das misturas betuminosas. Além disso, o pré-tratamento dos *dregs* no operador de gestão de resíduos para ser utilizado como matéria-prima alternativa na central de betuminoso gera ainda assim uma poupança de 0,28€ relativamente à operação de deposição dos *dregs* no aterro. Também a transformação dos *grits* no operador de gestão de resíduos gera uma poupança de 0,36€ relativamente à sua deposição em aterro. Assim, as operações (transportes, secagem e peneiração), que existem entre o produtor de resíduo e o recetor da matéria-prima alternativa (e produtor da mistura betuminosa) não produz mais custos do que a deposição do resíduo em aterro.

As operações do modelo circular dos *dregs* ou dos *grits* (produção e aplicação da mistura betuminosa a quente e transformação dos *dregs* e *grits* em matéria-prima alternativa) gera uma poupança de 3% e 4%, respetivamente, face às operações do modelo linear (produção e aplicação da mistura betuminosa a quente com deposição dos resíduos em aterro), porque os *dregs* e os *grits* são gratuitos para a indústria das misturas betuminosas e esta poupa parcialmente no custo de aquisição do agregado fino. Além disso, o produtor dos resíduos poupa também com a eliminação dos custos de deposição do resíduo em aterro, gerando aqui uma situação de duplo benefício (solução *win-win*), sempre desejável. Os custos do modelo linear e circular (Figura 71) provém essencialmente dos materiais, do transporte, do investimento em equipamento, do aluguer de equipamento, da mão de obra e da energia, da forma que se pode ver na Figura 72.

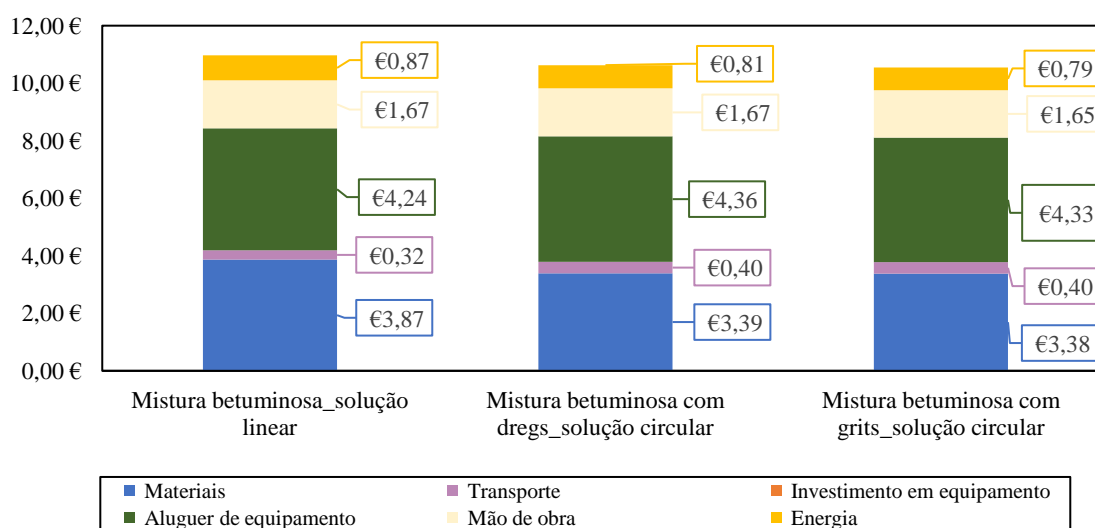


Figura 72. Distribuição dos tipos de custo do modelo linear e circular das misturas betuminosas por m² de mistura betuminosa com 5 cm de espessura.

O modelo linear e circular tem custos diferentes provenientes do tratamento dos resíduos, dos custos externos e do investimento em equipamento. O valor do transporte e do aluguer de equipamento das soluções circulares é encarecido em 0,08€ para ambos os resíduos e 0,12€ (para *dregs*) e 0,09€ (para *grits*), respetivamente, face à solução linear do transporte (0,32€) e do aluguer do equipamento (4,24€). Este aumento no aluguer do equipamento nas soluções circulares resulta da utilização das instalações do operador gestão de resíduos para se realizar as operações de secagem dos resíduos. Contudo, os *dregs* são ainda peneirados e

daí o agravamento no aluguer do equipamento face ao pré-tratamento dos *grits*. Por outro lado, o valor da mão de obra para os *grits* é o mesmo para o modelo linear e circular (1,65€), enquanto para os *dregs* é encarecido 0,02€ face à solução linear. Este agravamento na mão de obra dos *dregs* resulta da operação de peneiração do material, visto que os *grits* não necessitam desta operação.

Por outro lado, as soluções circulares geram ainda uma poupança nos materiais (0,48€ para *dregs* e 0,49 € para *grits*) face à solução linear, porque os resíduos são gratuitos para o produtor da indústria do betuminoso e, conseqüentemente, este poupa parcialmente no custo de aquisição do pó de calcário. Também, existe uma poupança associada à energia na solução circular (0,06€ para *dregs* e 0,08€ para *grits*) relativamente à solução linear (0,87€), porque os transportes dos *dregs* e *grits* consomem menos energia do que o transporte do pó de calcário. Além disso, a distância de transporte dos resíduos na solução circular (do produtor do resíduo até à central betuminosas) é reduzida em 14 km face à solução linear do transporte do pó de calcário.

6.1.3. Avaliação social

As categorias de impactos sociais considerados no modelo linear e circular foram as dos consumidores, comunidades locais, sociedade, atores da cadeia de valor e os trabalhadores. Os impactos nestas categorias resultam da agregação de várias subcategorias. Na Tabela 70 mostra-se as categorias e subcategorias associadas aos *stakeholders* nesta avaliação social. Os resultados dos impactos sociais foram calculados na ferramenta *OpenLCA* e a base de dados dos impactos sociais foi *PSILCA versão 2.0*. Durante a implementação do caso de estudo, foi realizado o inventário, de modo a calcular os impactos sociais respetivos.

Na Tabela 71 apresentam-se os resultados dos impactos sociais do modelo linear e circular na produção e aplicação da mistura betuminosa. Enquanto, na Figura 73 mostra-se as melhorias sociais alcançadas para o modelo circular. De acordo com os resultados da Tabela 71 e Figura 73, o modelo circular com *dregs* apresenta uma redução de 52,1%, 2,1%, 130,1%, 49,3% e 45,1% respetivamente na categoria dos consumidores, comunidades locais, sociedade, atores da cadeia de valor e trabalhadores, em relação ao modelo linear de produção e de aplicação da mistura betuminosa (que inclui a deposição do resíduo em aterro). Para o uso dos *grits* como agregado alternativo na produção e aplicação da mistura

betuminosa (modelo circular) resulta uma redução de 54,9%, 6,9%, 123,4%, 49,6% e 46,6% respetivamente na categoria dos consumidores, comunidades locais, sociedade, atores da cadeia de valor e trabalhadores, comparativamente à solução linear (que inclui a deposição do resíduo em aterro).

Tabela 70. *Stakeholders* – Categoria e subcategorias associadas para o modelo linear e circular.

| Stakeholder (Categoria) | Subcategorias |
|--------------------------------|---|
| Consumidores | Transparência |
| Comunidades locais | Acesso aos recursos materiais |
| | Emprego local |
| | Migração |
| | Respeito dos direitos indígenas |
| Sociedade | Condições de vida seguras e saudáveis |
| | Contribuição para o desenvolvimento económico |
| | Saúde e Segurança (sociedade) |
| Atores da cadeia de valor | Corrupção |
| | Concorrência leal |
| | Promoção da responsabilidade social |
| Trabalhadores | Trabalho infantil |
| | Discriminação |
| | Salário justo |
| | Trabalho forçado |
| | Segurança e saúde (trabalhadores) |
| | Benefícios sociais e questões legais |
| | Tempo de trabalho |

Tabela 71. Desempenho social do ciclo de vida do modelo linear e circular das misturas betuminosas.

| Categoria | Unidade | Mistura betuminosa do modelo linear | Mistura betuminosa com <i>dregs</i> do modelo circular | Mistura betuminosa com <i>grits</i> do modelo circular |
|---------------------------|----------------------|--|---|---|
| Consumidores | Horas de risco médio | 0,014 | 0,007 | 0,006 |
| Comunidades locais | Horas de risco médio | 63,702 | 62,394 | 59,276 |
| Sociedade | Horas de risco médio | 0,365 | -0,110 | -0,086 |
| Atores da cadeia de valor | Horas de risco médio | 38,032 | 19,294 | 19,176 |
| Trabalhadores | Horas de risco médio | 59,954 | 32,933 | 32,031 |

Os impactos sociais da Tabela 71 resultam maioritariamente da produção das misturas betuminosas e dos trabalhos de pavimentação. Por outro lado, os impactos sociais da transformação (transportes e tratamento) dos *dregs* e dos *grits*, como matéria-prima alternativa são maiores do que os impactos sociais da deposição dos resíduos em aterro (modelo linear), devido ao aumento de mão de obra e do tempo de execução da secagem dos resíduos no operador de gestão de resíduos. Todavia, em contrapartida, os impactos sociais

da produção das misturas betuminosas e dos trabalhos de pavimentação do modelo circular (*dregs* e *grits*) são reduzidos relativamente ao modelo linear, devido à substituição parcial do pó de calcário e da redução dos gastos (energia e mão de obra) associados ao transporte do pó de calcário natural.

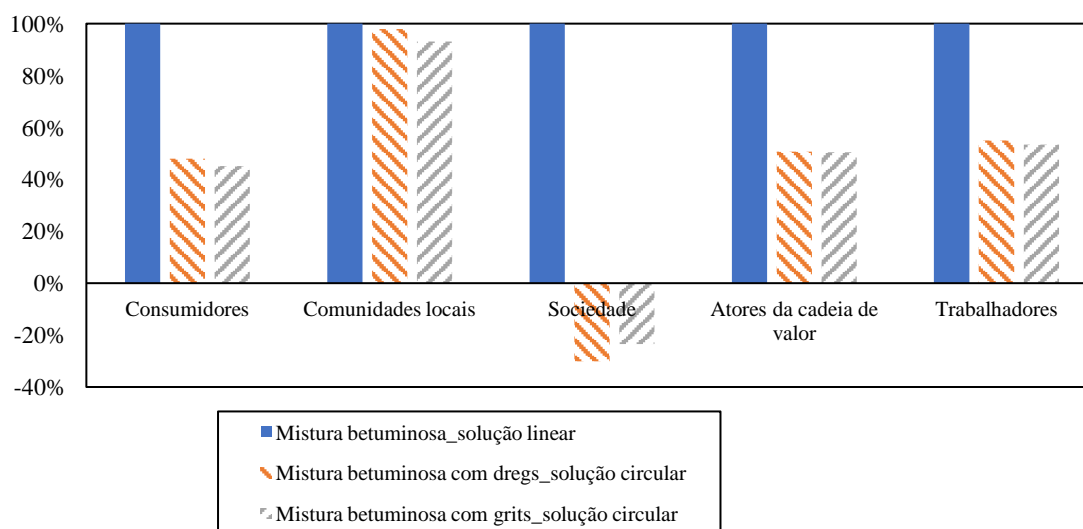


Figura 73. Melhorias sociais atingidas pelas misturas betuminosas.

6.2. Valorização de resíduos em betão pré-fabricado

Tal como no caso piloto anterior, antes da avaliação de ciclo de vida (ACV) nas dimensões social, ambiental e económica, é necessário definir a unidade funcional e os limites do sistema. Na Figura 74 apresenta-se a fronteira do modelo linear e circular deste segundo caso de estudo (betão pré-fabricado).

Este caso piloto também usou as mesmas ferramentas (Simapro 9.2.0.1 e OpenLCA) e as mesmas bases de dados (Ecoinvent 3.4 e PSILCA versão 2.0) que no caso de estudo dos pavimentos rodoviários, de modo a avaliar os impactos ambientais, económicos e sociais.

No caso da solução linear definiram-se dois limites, o primeiro, a deposição da cinza de cal em aterro e, o segundo, a produção do betão pré-fabricado (para asnas e pilares) usando o filler natural. No caso circular, o filler natural é substituído totalmente pelo resíduo cinza de cal na produção de betão pré-fabricado (para asnas e pilares), evitando-se a deposição deste resíduo em aterro e a extração de matérias-primas naturais que ele substituirá

integralmente. O fim de vida de ambas as soluções, linear e circular, não foram consideradas nos limites do sistema devido à inexistência de diferenças entre elas.

Além da definição dos limites do sistema linear e circular (Figura 74), a unidade funcional foi também definida para este caso de estudo, sendo os resultados de ACV obtidos nas dimensões social, económica e ambiental sempre colocados em função da produção de 1 m³ de betão pré-fabricado para a construção de um pilar ou de uma asna. Os resultados são neste caso apresentados separadamente pois o teor de substituição do filler natural pelo resíduo cinza de cal é diferente na formulação do betão para os pilares e as asnas (4,4% e 2,4%, respetivamente), conduzindo a valores de impactes naturalmente diferentes.

Relativamente ao procedimento de alocação, foi aplicado um modelo de sistema de corte e, como anteriormente, os materiais recicláveis estão disponíveis sem encargos para os processos de reciclagem e os materiais alternativos (reciclados) suportam apenas os impactos dos processos de reciclagem. Também não foi utilizado qualquer outro procedimento de atribuição neste estudo.

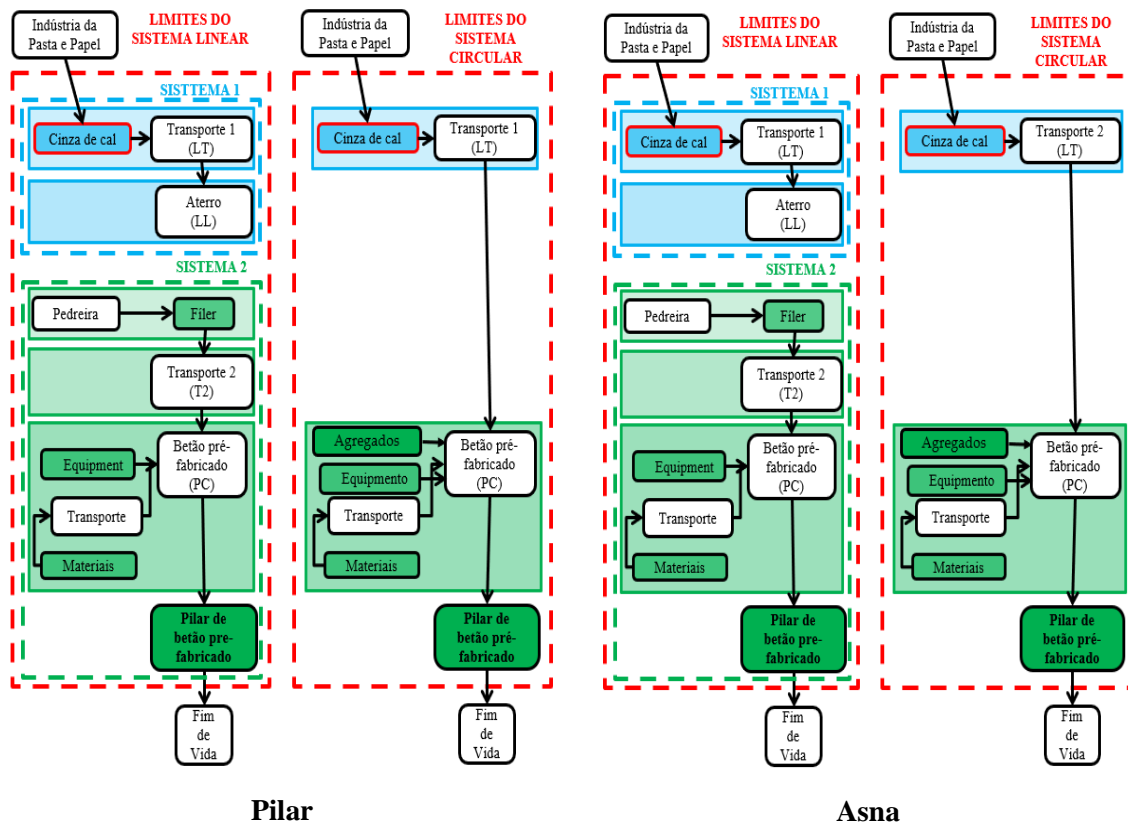


Figura 74. Processos, etapas e limites do sistema de produto (asna e pilar de betão).

6.2.1. Avaliação ambiental

6.2.1.1. Pilares

No modelo linear o resíduo (cinza de cal) é transportado desde a unidade de produção de pasta e papel até ao aterro a uma distância de 1,5 km. Nesta etapa da deposição dos resíduos em aterro, os impactos resultam dos trabalhos de escavação através da escavadora hidráulica (HD), do movimento do resíduo através da pá carregadora (SSL) e da própria deposição do resíduo em aterro.

Na Tabela 72 apresentam-se os impactos gerados pela atividade da deposição do resíduo em aterro, seguindo a unidade funcional de produção de betão pré-fabricado (1m^3) para pilares. Esta composição do betão incorpora 104 kg de filler por m^3 de betão (Tabela 56), pelo que os impactos da deposição da cinza de cal em aterro estão de acordo com a quantidade de filler natural utilizada no betão, considerando que a relação de substituição do resíduo (cinza de cal) por filler natural é 1:1, ou seja, de 100%.

Relativamente à produção do betão (modelo linear), existem os impactos associados à utilização das matérias-primas (britas e areias), como se pode ver na Tabela 73. Além disso, na Tabela 74 mostram-se os impactos dos restantes componentes do betão (filler, superplastificante, água e cimento) e o transporte do filler natural do produtor até ao produtor de betão pré-fabricado (82km).

Tabela 72. Resultados dos impactos ambientais da deposição do resíduo em aterro seguindo a produção de betão para o pilar.

| Categoria | Unidade | Transporte (1,5km) | Escavação (HD) | Movimento do resíduo (SSL) | Aterro |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $2,14 \times 10^{-2}$ | $4,99 \times 10^{-2}$ | $5,00 \times 10^{-2}$ | $3,06 \times 10^{-1}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $3,98 \times 10^{-9}$ | $9,40 \times 10^{-9}$ | $9,36 \times 10^{-9}$ | $4,74 \times 10^{-8}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $7,54 \times 10^{-5}$ | $3,88 \times 10^{-4}$ | $3,88 \times 10^{-4}$ | $2,26 \times 10^{-3}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $1,47 \times 10^{-5}$ | $8,61 \times 10^{-5}$ | $8,62 \times 10^{-5}$ | $1,08 \times 10^1$ |
| POFP | kg NMVOC | $1,04 \times 10^{-4}$ | $7,21 \times 10^{-4}$ | $7,22 \times 10^{-4}$ | $3,76 \times 10^{-3}$ |
| ADP | kg Sb eq | $4,87 \times 10^{-11}$ | $1,36 \times 10^{-9}$ | $1,61 \times 10^{-9}$ | $7,66 \times 10^{-9}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | $3,09 \times 10^{-1}$ | $7,29 \times 10^{-1}$ | $7,27 \times 10^{-1}$ | 4,13 |
| WU | m ³ | $1,12 \times 10^{-3}$ | $1,57 \times 10^{-3}$ | $1,58 \times 10^{-3}$ | $1,57 \times 10^{-2}$ |
| CED | MJ | $3,31 \times 10^{-1}$ | $7,79 \times 10^{-1}$ | $7,77 \times 10^{-1}$ | 4,45 |

Tabela 73. Impactos ambientais dos agregados na produção de betão pré-fabricado do pilar.

| Categoria | Unidade | Brita calcária (12/25mm) | Brita calcária (8/12mm) | Areia grossa | Areia fina |
|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 9,87 | 5,67 | 5,45 | 3,20 |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | 1,08×10 ⁻⁶ | 6,18×10 ⁻⁰⁷ | 8,02×10 ⁻⁰⁷ | 4,70×10 ⁻⁰⁷ |
| AP | kg SO ₂ eq | 5,48×10 ⁻⁵ | 3,14×10 ⁻⁰² | 3,35×10 ⁻⁰² | 1,96×10 ⁻⁰² |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 1,45×10 ⁻² | 8,31×10 ⁻⁰³ | 7,04×10 ⁻⁰³ | 4,13×10 ⁻⁰³ |
| POFP | kg NMVOC | 5,44×10 ⁻² | 3,13×10 ⁻⁰² | 3,97×10 ⁻⁰² | 2,33×10 ⁻⁰² |
| ADP | kg Sb eq | 1,02×10 ⁻⁶ | 5,83×10 ⁻⁰⁷ | 2,98×10 ⁻⁰⁷ | 1,75×10 ⁻⁰⁷ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 1,20×10 ² | 6,89×10 ¹ | 7,22×10 ¹ | 4,23×10 ¹ |
| WU | m ³ | 9,75 | 5,60 | 3,36×10 ¹ | 1,97×10 ¹ |
| CED | MJ | 1,45×10 ² | 8,33×10 ¹ | 8,21×10 ¹ | 4,81×10 ¹ |

Tabela 74. Impactos ambientais para os outros componentes da formulação do betão pré-fabricado do pilar.

| Categoria | Unidade | Transporte (82km) | Super-plastificante | Cimento | Água | Filler |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 6,06×10 ⁻¹ | 4,20 | 2,15×10 ² | 1,86×10 ⁻² | 1,56 |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | 1,11×10 ⁻⁷ | 6,56×10 ⁻⁷ | 6,54×10 ⁻⁶ | 2,01×10 ⁻⁹ | 1,69×10 ⁻⁷ |
| AP | kg SO ₂ eq | 2,07×10 ⁻³ | 2,30×10 ⁻² | 3,75×10 ⁻¹ | 9,99×10 ⁻⁵ | 8,63×10 ⁻³ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 3,99×10 ⁻⁴ | 5,29×10 ⁻³ | 9,79×10 ⁻² | 5,72×10 ⁻⁵ | 2,28×10 ⁻³ |
| POFP | kg NMVOC | 2,83×10 ⁻³ | 1,63×10 ⁻² | 3,73×10 ⁻¹ | 4,07×10 ⁻⁵ | 8,58×10 ⁻³ |
| ADP | kg Sb eq | 1,36×10 ⁻⁹ | 2,75×10 ⁻⁵ | 3,60×10 ⁻⁶ | 2,65×10 ⁻⁸ | 1,60×10 ⁻⁷ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 8,65 | 9,54×10 ¹ | 7,88×10 ² | 2,02×10 ⁻¹ | 1,89×10 ¹ |
| WU | m ³ | 3,14×10 ⁻² | 3,57 | 1,39×10 ¹ | 1,52 | 1,54 |
| CED | MJ | 9,24 | 1,12×10 ² | 9,93×10 ² | 4,25×10 ⁻¹ | 2,29×10 ¹ |

Os impactos da produção de betão pré-fabricado (Tabela 73 e Tabela 74) resultam maioritariamente da utilização do cimento, exceto na categoria do uso da água (WU) e da depleção dos recursos abióticos não fósseis (ADP) que resultam da utilização da areia grossa e do superplastificante, respetivamente. O cimento contribui entre 66 e 88% para os impactos ambientais da produção de betão, nas categorias do aquecimento global (GWP 100^a), da depleção do ozono estratosférico (ODP), da acidificação (AP), da eutrofização (EP), da formação de oxidantes fotoquímicos (POFP), da depleção de recursos abióticos fósseis (ADP-FF) e das necessidades de energia cumulativa (CED). Esta contribuição resulta da produção do produto intermediário (clínquer), que consome grandes quantidades de matérias-primas (calcário, argila, gesso, minério de ferro, bauxite, etc.) e de energia fóssil no seu fabrico (da Costa *et al.*, 2019). No caso das areias, estas contribuem aproximadamente com 60% do impacto no uso da água, devido ao consumo de água na etapa de lavagem da matéria-prima, durante a fase de extração (Estanqueiro *et al.*, 2018). Por outro lado, o superplastificante e o cimento geram 82 e 10% respetivamente dos impactos da depleção de recursos abióticos não fósseis (ADP).

Na Tabela 75 apresenta-se os impactos gerados na produção do betão pré-fabricado para pilares aliado à deposição da cinza de cal em aterro. Os impactos do modelo linear (Tabela 75) resultam maioritariamente da produção de betão, exceto na categoria de eutrofização que resulta da deposição da cinza de cal em aterro.

Tabela 75. Impactos ambientais do aterro, da produção de betão pré-fabricado e do total do modelo linear.

| Categoria | Unidade | Aterro | Betão pré-fabricado do pilar (referência) | Total dos impactos do modelo linear |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|--|
| GWP | kg CO ₂ eq | $4,27 \times 10^{-1}$ | $2,46 \times 10^2$ | $2,46 \times 10^2$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $7,01 \times 10^{-8}$ | $1,04 \times 10^{-5}$ | $1,05 \times 10^{-5}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $3,11 \times 10^{-3}$ | $5,48 \times 10^{-1}$ | $5,51 \times 10^{-1}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $1,08 \times 10^1$ | $1,40 \times 10^{-1}$ | $1,09 \times 10^1$ |
| POFP | kg NMVOC | $5,31 \times 10^{-3}$ | $5,50 \times 10^{-1}$ | $5,55 \times 10^{-1}$ |
| ADP | kg Sb eq | $1,07 \times 10^{-8}$ | $3,34 \times 10^{-5}$ | $3,34 \times 10^{-5}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 5,89 | $1,21 \times 10^3$ | $1,22 \times 10^3$ |
| WU | m ³ | $2,00 \times 10^{-2}$ | $8,91 \times 10^1$ | $8,92 \times 10^1$ |
| CED | MJ | 6,34 | $1,50 \times 10^3$ | $1,50 \times 10^3$ |

Para alterar os impactos gerados nas opções do modelo linear foi desenvolvido um modelo circular, onde o resíduo é nele usado como matéria-prima alternativa na produção do betão pré-fabricado. Os impactos resultantes das operações de gestão de resíduo do modelo linear (Tabela 72) não existem no modelo circular, porque a deposição do resíduo em aterro já não é efetuada e, além disso, a cinza de cal não necessita de nenhuma operação de pré-tratamento para ser incorporada como matéria-prima alternativa às naturais na produção do betão pré-fabricado.

Embora num pequeno teor (4,4%), o filler natural é substituído na totalidade por cinza de cal e a restante formulação (britas, areia cimento, superplastificante e água) do betão mantém-se igual à formulação do betão no modelo linear (Tabela 56). Deste modo, os impactos das britas, areias, cimento, superplastificante e água mantém-se os mesmos do que no caso linear (Tabela 73 e Tabela 74). Por outro lado, os impactos resultantes da utilização do filler natural desaparecem neste caso circular e os impactos do transporte da cinza de cal são aproximadamente reduzidos de 28% dos impactos do transporte do filler natural. Ou seja, a utilização da cinza de cal permite reduzir os impactos do transporte em 72% relativamente ao transporte do filler natural do modelo linear, devido à diminuição da distância de transporte entre o caso do filler natural e da cinza de cal (de 82km para 23km).

Na Tabela 76 mostra-se os impactos associados ao transporte da cinza de cal, bem como, os impactos da produção do betão com cinza de cal. A diferença dos impactos da solução linear e circular do betão pré-fabricado é conseguida pela eliminação dos impactos associados à deposição do resíduo em aterro e da eliminação dos impactos associados à utilização do filler, bem como pela redução dos impactos no transporte da matéria-prima alternativa relativamente ao filler.

Tabela 76. Resultados dos impactos ambientais do transporte da cinza de cal para o betão pré-fabricado do pilar e total dos impactos ambientais do modelo circular do betão pré-fabricado (pilar).

| Categoria | Unidade | Transporte (23 km) | Betão pré-fabricado com cinza de cal | Redução do impacto com o modelo circular |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|---|
| GWP | kg CO ₂ eq | $1,70 \times 10^{-1}$ | $2,44 \times 10^2$ | 1% |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $3,12 \times 10^{-8}$ | $1,02 \times 10^{-5}$ | 3% |
| AP | kg SO ₂ eq | $5,80 \times 10^{-4}$ | $5,38 \times 10^{-1}$ | 2% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $1,12 \times 10^{-4}$ | $1,37 \times 10^{-1}$ | 99% |
| POFP | kg NMVOC | $7,95 \times 10^{-4}$ | $5,39 \times 10^{-1}$ | 3% |
| ADP | kg Sb eq | $3,82 \times 10^{-10}$ | $3,32 \times 10^{-5}$ | 1% |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 2,43 | $1,19 \times 10^3$ | 3% |
| WU | m ³ | $8,79 \times 10^{-3}$ | $8,76 \times 10^1$ | 2% |
| CED | MJ | 2,59 | $1,47 \times 10^3$ | 2% |

Adotando a solução do modelo circular, esta permite reduzir entre 1 e 3% dos impactos face à solução linear (Tabela 76 e Figura 75), exceto na categoria da eutrofização (EP) cuja redução é de 99% devido principalmente à eliminação das operações da deposição do resíduo em aterro (Tabela 72).

Na Figura 75 apresenta-se comparativamente os resultados do modelo linear e circular. A redução dos impactos no modelo circular não é maior, porque a taxa de incorporação do filler/cinza de cal é baixa (4,4%) mas há uma tendência clara de diminuição em todos os parâmetros. Os impactos do cimento são elevados relativamente às outras matérias-primas tradicionais (areias, britas, água e superplastificante) (Kim *et al.*, 2016; Roh *et al.*, 2020). O uso complementar de outros resíduos como matérias-primas alternativas relativamente aos diversos componentes do betão deve ser explorado de modo a minimizar ainda mais os impactos, mas garantindo que o desempenho técnico se mantém para se ter uma solução circular competitiva com a tradicional.

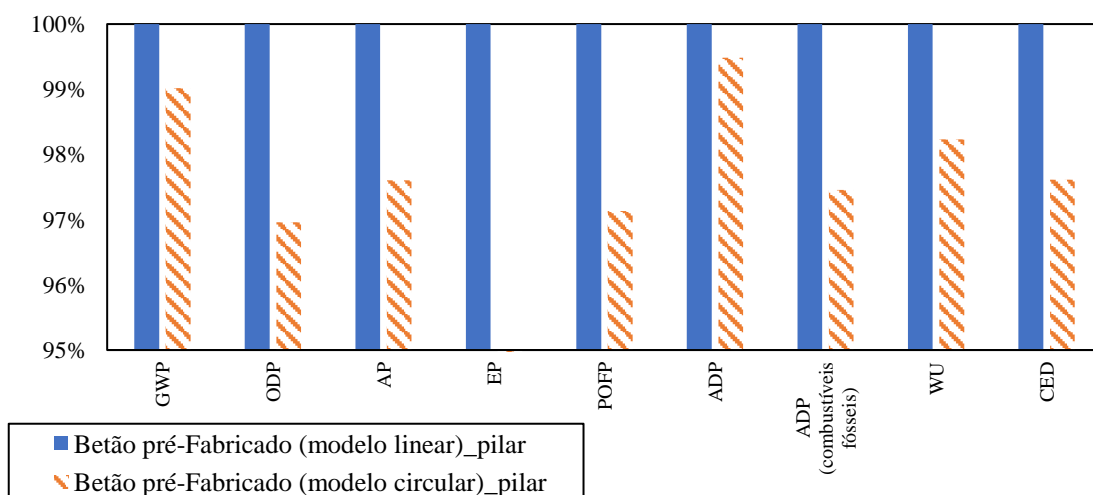


Figura 75. Melhorias ambientais atingidas no modelo circular (pilar).

6.1.1.2. Asnas

A produção das asnas pelo modelo linear e circular segue as mesmas características da produção dos pilares. Ou seja, a fronteira do sistema (Figura 74) e a unidade funcional (1m^3 de betão) mantêm-se, de modo a avaliar o modelo linear (produção do betão com filler natural e deposição da cinza de cal em aterro) e circular (produção do betão com cinza de cal em substituição do filler calcário natural).

Como alguns constituintes na formulação do betão para asnas, nomeadamente, o filler natural, o cimento, o superplastificante e a água não têm os mesmos teores que na composição do pilar, (ver na Tabela 56), os resultados são aqui apresentados em separado nesta secção. Assim, a composição da asna utiliza uma percentagem de filler mais baixa (2,4%) do que a composição do betão do pilar (4,4%) e, por isso, o betão da asna incorporou 54kg em vez dos 104 kg de filler natural nos pilares. Assim, os impactos da deposição da cinza de cal em aterro são aqui calculados de acordo com a quantidade filler usada na produção de betão das asnas (54kg).

Na Tabela 77 apresentam-se os impactos da deposição da cinza de cal em aterro que resultam das atividades de transporte, de escavação, do movimento do resíduo e da deposição do resíduo em aterro.

Tabela 77. Resultados dos impactos ambientais da deposição do resíduo em aterro seguindo a produção de betão para a asna

| Categoria | Unidade | Transporte (1,5km) | Escavação (HD) | Movimento do resíduo (SSL) | Aterro |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 1,11×10 ⁻² | 2,59×10 ⁻² | 2,60×10 ⁻² | 1,59×10 ⁻¹ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | 2,07×10 ⁻⁹ | 4,88×10 ⁻⁹ | 4,86×10 ⁻⁹ | 2,46×10 ⁻⁸ |
| AP | kg SO ₂ eq | 3,91×10 ⁻⁵ | 2,01×10 ⁻⁴ | 2,01×10 ⁻⁴ | 1,17×10 ⁻³ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 7,62×10 ⁻⁶ | 4,47×10 ⁻⁵ | 4,47×10 ⁻⁵ | 5,59 |
| POFP | kg NMVOC | 5,42×10 ⁻⁵ | 3,74×10 ⁻⁴ | 3,75×10 ⁻⁴ | 1,95×10 ⁻³ |
| ADP | kg Sb eq | 2,53×10 ⁻¹¹ | 7,08×10 ⁻¹⁰ | 8,37×10 ⁻¹⁰ | 3,98×10 ⁻⁹ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 1,61×10 ⁻¹ | 3,78×10 ⁻¹ | 3,77×10 ⁻¹ | 2,14 |
| WU | m ³ | 5,82×10 ⁻⁴ | 8,14×10 ⁻⁴ | 8,23×10 ⁻⁴ | 8,17×10 ⁻³ |
| CED | MJ | 1,72×10 ⁻¹ | 4,05×10 ⁻¹ | 4,03×10 ⁻¹ | 2,31 |

Na produção do betão pré-fabricado para asnas, os impactos de alguns constituintes (Tabela 78), nomeadamente os agregados, são os mesmos da produção do betão pré-fabricado para pilares (Tabela 73), quando os constituintes são os mesmos bem como a sua taxa de incorporação no betão.

Tabela 78. Impactos ambientais dos agregados na produção de betão pré-fabricado da asna.

| Categoria | Unidade | Brita calcária (12/25mm) | Brita calcária (8/12mm) | Areia grossa | Areia fina |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | 9,87 | 5,67 | 5,45×10 | 3,20 |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | 1,08×10 ⁻⁶ | 6,18×10 ⁻⁷ | 8,02×10 ⁻⁷ | 4,70×10 ⁻⁷ |
| AP | kg SO ₂ eq | 5,48×10 ⁻² | 3,14×10 ⁻² | 3,35×10 ⁻² | 1,96×10 ⁻² |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 1,45×10 ⁻² | 8,31×10 ⁻³ | 7,04×10 ⁻³ | 4,13×10 ⁻³ |
| POFP | kg NMVOC | 5,44×10 ⁻² | 3,13×10 ⁻² | 3,97×10 ⁻² | 2,33×10 ⁻² |
| ADP | kg Sb eq | 1,02×10 ⁻⁶ | 5,83×10 ⁻⁷ | 2,98×10 ⁻⁷ | 1,75×10 ⁻⁷ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 1,20×10 ² | 6,89×10 ¹ | 7,22×10 ¹ | 4,23×10 ¹ |
| WU | m ³ | 9,75 | 5,60 | 3,36×10 ¹ | 1,97×10 ¹ |
| CED | MJ | 1,45×10 ² | 8,33×10 ¹ | 8,21×10 ¹ | 4,81×10 ¹ |

Na Tabela 79 mostram-se os impactos de outros constituintes do processo produtivo do betão para asnas como o transporte do filler natural desde o extrator até ao produtor de betão, do superplastificante, do cimento, da água e do filler. Os impactos do cimento, da água e do superplastificante aumentam comparativamente ao do betão dos pilares (Tabela 74), devido à maior taxa de incorporação destes elementos nas asnas relativamente à formulação do pilar. Por outro lado, os impactos do transporte e da utilização do filler no betão diminui, porque a taxa de incorporação desta matéria-prima é mais baixa do que na composição do pilar.

Tabela 79. Impactos ambientais para os outros componentes da formulação do betão pré-fabricado da asna.

| Categoria | Unidade | Transporte (82km) | Super-plastificante | Cimento | Água | Filler |
|----------------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $3,15 \times 10^{-1}$ | $5,29 \times 10$ | $2,63 \times 10^2$ | $2,01 \times 10^{-2}$ | $8,08 \times 10^{-1}$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $5,78 \times 10^{-8}$ | $8,25 \times 10^{-7}$ | $7,98 \times 10^{-6}$ | $2,18 \times 10^{-9}$ | $8,80 \times 10^{-8}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $1,07 \times 10^{-3}$ | $2,89 \times 10^{-2}$ | $4,58 \times 10^{-1}$ | $1,08 \times 10^{-4}$ | $4,48 \times 10^{-3}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $2,07 \times 10^{-4}$ | $6,66 \times 10^{-3}$ | $1,19 \times 10^{-1}$ | $6,20 \times 10^{-5}$ | $1,18 \times 10^{-3}$ |
| POFP | kg NMVOC | $1,47 \times 10^{-3}$ | $2,06 \times 10^{-2}$ | $4,55 \times 10^{-1}$ | $4,41 \times 10^{-5}$ | $4,45 \times 10^{-3}$ |
| ADP | kg Sb eq | $7,07 \times 10^{-10}$ | $3,46 \times 10^{-5}$ | $4,39 \times 10^{-6}$ | $2,87 \times 10^{-8}$ | $8,31 \times 10^{-8}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 4,49 | $1,20 \times 10^2$ | $9,61 \times 10^2$ | $2,19 \times 10^{-1}$ | 9,82 |
| WU | m ³ | $1,63 \times 10^{-2}$ | 4,49 | $1,69 \times 10^1$ | 1,65 | $7,98 \times 10^{-1}$ |
| CED | MJ | 4,80 | $1,41 \times 10^2$ | $1,21 \times 10^3$ | $4,60 \times 10^{-1}$ | $1,19 \times 10^1$ |

Tabela 80. Impactos ambientais do aterro, da produção de betão pré-fabricado da asna e do total do modelo linear.

| Categoria | Unidade | Aterro | Betão pré-fabricado da asna (referência) | Total dos impactos do modelo linear |
|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--|-------------------------------------|
| GWP | kg CO ₂ eq | $2,22 \times 10^{-1}$ | $2,93 \times 10^2$ | $2,93 \times 10^2$ |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $3,64 \times 10^{-8}$ | $1,19 \times 10^{-5}$ | $1,20 \times 10^{-5}$ |
| AP | kg SO ₂ eq | $1,61 \times 10^{-3}$ | $6,31 \times 10^{-1}$ | $6,33 \times 10^{-1}$ |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | 5,59 | $1,61 \times 10^{-1}$ | 5,75 |
| POFP | kg NMVOC | $2,76 \times 10^{-3}$ | $6,31 \times 10^{-1}$ | $6,33 \times 10^{-1}$ |
| ADP | kg Sb eq | $5,55 \times 10^{-9}$ | $4,12 \times 10^{-5}$ | $4,12 \times 10^{-5}$ |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 3,06 | $1,40 \times 10^3$ | $1,40 \times 10^3$ |
| WU | m ³ | $1,04 \times 10^{-2}$ | $9,25 \times 10^1$ | $9,25 \times 10^1$ |
| CED | MJ | $3,29 \times 10$ | $1,73 \times 10^3$ | $1,73 \times 10^3$ |

Na Tabela 80 reúnem-se os impactos gerados na produção do betão pré-fabricado da asna e da deposição da cinza de cal em aterro. Os impactos deste modelo linear (Tabela 80) resultam maioritariamente da produção de betão, exceto na categoria de eutrofização que resulta da deposição da cinza de cal em aterro. Ao comparar os modelos lineares (Tabela 75 e Tabela 80), verifica-se que os impactos aumentam na produção da asna, devido ao aumento da utilização de cimento, sendo que este componente gera mais impactos do que a redução de outros elementos (água, filler natural, superplastificante e cinza de cal).

Relativamente à produção do betão da asna pela solução circular, os impactos das britas, das areias, do superplastificante, do cimento e da água são iguais à produção pelo betão do modelo linear, como se pode ver pela Tabela 78 e Tabela 79. Além disso, os impactos da deposição da cinza de cal no aterro são eliminados bem como os impactos da utilização do filler. Ao mesmo tempo, os impactos do transporte são reduzidos devido ao encurtamento na distância de transporte (de 82km para 23km).

Na Tabela 81 mostram-se os impactos associados ao transporte da cinza de cal bem como os impactos da produção do betão com cinza de cal. A diferença dos impactos da solução linear e circular do betão pré-fabricado para asnas é conseguida pela eliminação dos impactos associados à deposição do resíduo em aterro e da eliminação dos impactos associados à utilização do filler, bem como pela redução dos impactos no transporte da matéria-prima alternativa relativamente ao filler.

Tabela 81. Resultados dos impactos ambientais do transporte da cinza de cal para o betão pré-fabricado da asna e total dos impactos ambientais do modelo circular do betão pré-fabricado (asna).

| Categoria | Unidade | Transporte (23 km) | Betão pré-fabricado com cinza de cal | Redução do impacto com o modelo circular |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|---|
| GWP | kg CO ₂ eq | $8,83 \times 10^{-2}$ | $2,92 \times 10^2$ | 0,4% |
| ODP | kg CFC ⁻¹¹ eq | $1,62 \times 10^{-8}$ | $1,18 \times 10^{-5}$ | 1,4% |
| AP | kg SO ₂ eq | $3,01 \times 10^{-4}$ | $6,26 \times 10^{-1}$ | 1,1% |
| EP | kg PO ₄ ³⁻ eq | $5,82 \times 10^{-5}$ | $1,60 \times 10^{-1}$ | 97,2% |
| POFP | kg NMVOC | $4,13 \times 10^{-4}$ | $6,25 \times 10^{-1}$ | 1,3% |
| ADP | kg Sb eq | $1,98 \times 10^{-10}$ | $4,11 \times 10^{-5}$ | 0,2% |
| ADP (combustíveis fósseis) | MJ | 1,26 | $1,39 \times 10^3$ | 1,1% |
| WU | m ³ | $4,57 \times 10^{-3}$ | $9,17 \times 10^1$ | 0,9% |
| CED | MJ | 2,59 | $1,47 \times 10^3$ | 1,1% |

Adotando a solução do modelo circular, esta permite reduzir entre 0,2 e 1,4% dos impactos face à solução linear (Tabela 81 e Figura 76), exceto na categoria da eutrofização (EP), visto que a redução é grande (97,2%) devido, principalmente, à eliminação das operações da deposição do resíduo em aterro (Tabela 72).

Na Figura 76 apresentam-se comparativamente os resultados do modelo linear e circular. A redução dos impactes no modelo circular não é maior pois a taxa de incorporação da cinza de cal é baixa (2,4%), mas aponta uma tendência clara de diminuição em todos os parâmetros. Os impactos do cimento são elevados relativamente às outras matérias-primas tradicionais (areias, britas, água e superplastificante) ((Kim *et al.*, 2016; Roh *et al.*, 2020)). O uso de outros resíduos como matérias-primas alternativas relativamente aos outros componentes deve ser intensamente explorado para se minimizar ainda mais os impactos mas, mantendo o desempenho técnico para garantir a competitividade da solução.

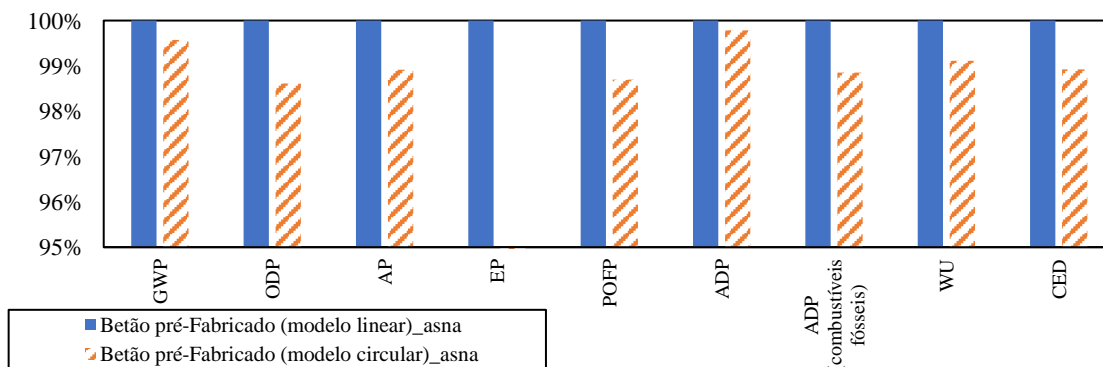


Figura 76. Melhorias ambientais atingidas no modelo circular (asna).

6.2.2. Avaliação económica

6.2.2.1. Pilares

A operação principal do modelo linear e circular centra-se na produção de betão pré-fabricado, mas, nesta avaliação económica, existem outras operações como a da deposição da cinza de cal em aterro e do transporte da cinza de cal do produtor do resíduo até ao produtor de betão pré-fabricado (modelo circular) que devem ser consideradas. Na Figura 77 mostra-se os custos de operação do modelo linear e circular do pilar.

O uso da cinza de cal na produção do betão pré-fabricado do pilar gera uma poupança de 3.30 €, devido à eliminação do custo de aquisição do filler natural pelo produtor do betão. Além disso, o transporte da cinza de cal até ao produtor de betão gera uma poupança de 0,32€, relativamente à deposição da cinza de cal no aterro. Assim, o transporte da cinza de cal até ao produtor de betão (23km) produz menos custos do que a deposição do resíduo em aterro.

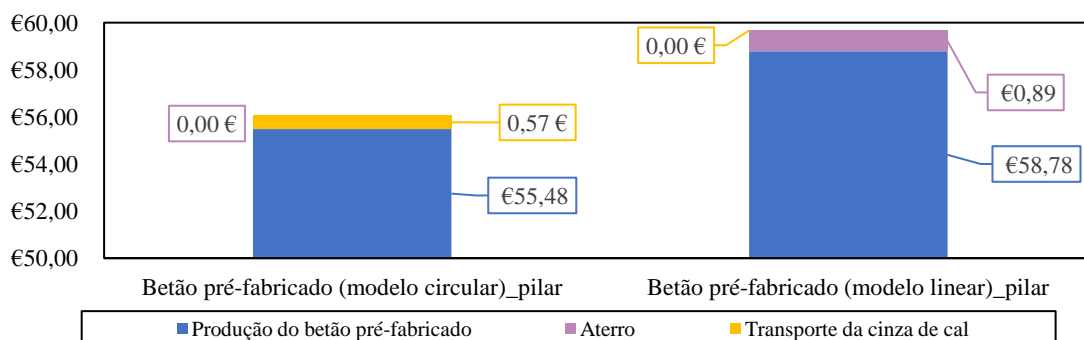


Figura 77. Custos por operação do modelo linear e circular do pilar por m³ de betão.

As operações do modelo circular (produção de betão pré-fabricado com cinza de cal e transporte do resíduo até ao produtor de betão) gera uma poupança de 6% face às operações do modelo linear (produção do betão pré-fabricado e deposição do resíduo em aterro) porque a cinza de cal é gratuita para a indústria do betão pré-fabricado e esta poupa no custo de aquisição do filler. Além disso, o produtor do resíduo poupa também com a eliminação dos custos de deposição do resíduo em aterro. Os custos do modelo linear e circular (Figura 77) resultam dos materiais, do transporte, do investimento em equipamento, do aluguer de equipamento, da mão de obra e da energia, como se pode ver na Figura 78.

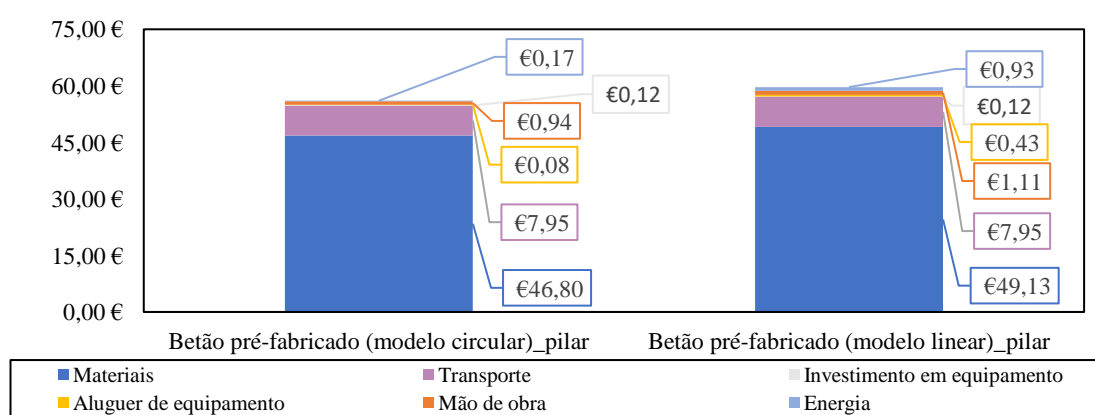


Figura 78. Distribuição dos tipos de custo do modelo linear e circular do pilar por m³ de betão.

O modelo linear e circular não tem custos provenientes do tratamento do resíduo e dos custos externos, mas o valor do investimento em equipamento e do transporte é o mesmo para o modelo linear e circular, (0,12€ e 7,95€, respetivamente). Isto significa que a implementação do modelo circular pode usar os equipamentos que foram usados no modelo linear e assim não requer investimento adicional. Porém, as poupanças aparecem nos custos do aluguer do equipamento, da mão de obra e da energia, nomeadamente, de 0,35€, 0,16€ e 0,76€, respetivamente, porque as tarefas resultantes da deposição do resíduo em aterro desaparecem no modelo circular.

Além disso, o uso da cinza de cal como filler no betão gera uma poupança na distância de transporte (de 49km) face à utilização do filler natural. Por isso, o transporte da cinza de cal consome menos mão de obra e energia do que o transporte do filler natural. Por fim, a maior poupança (2,33€) aparece na aquisição de materiais do modelo circular relativamente ao modelo linear tradicional, porque a cinza de cal não representa um custo para o produtor de betão.

6.2.2.2. Asnas

Tal como no caso acima, a operação principal do modelo linear e circular centra-se na produção de betão pré-fabricado para asnas, mas, existem as operações da deposição da cinza de cal em aterro e o transporte da cinza de cal do produtor do resíduo até ao produtor de betão pré-fabricado (modelo circular) a ser consideradas. Na Figura 79 mostram-se os custos de operação do modelo linear e circular para este caso das asnas em betão.

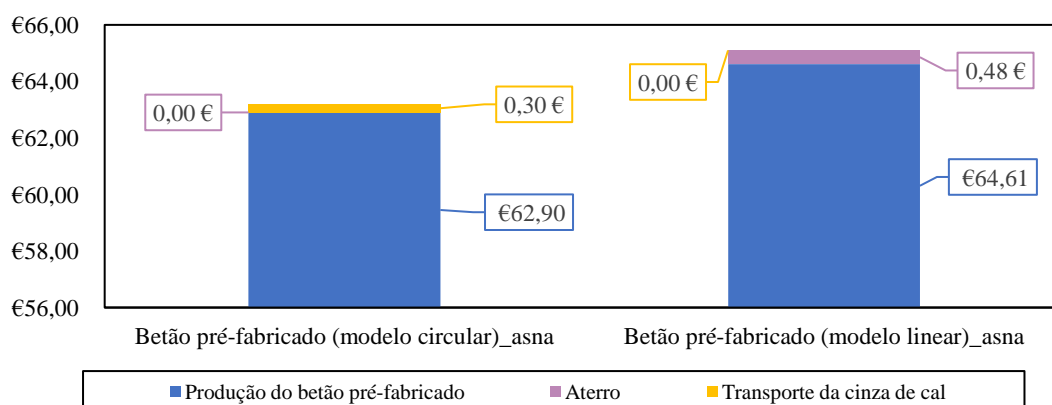


Figura 79. Custos por operação do modelo linear e circular da asna por m³ de betão.

O uso da cinza de cal na produção do betão pré-fabricado das asnas também gera uma poupança no custo de aquisição do fíler natural pelo produtor do betão de 1,71 €, devido à eliminação do custo de aquisição do filler natural pelo produtor do betão. Além disso, o transporte da cinza de cal até ao produto de betão gera uma poupança de 0,18€, relativamente à deposição da cinza de cal no aterro. Assim, o transporte da cinza de cal até ao produtor de betão (de 23km) não produz mais custos do que a deposição do resíduo em aterro.

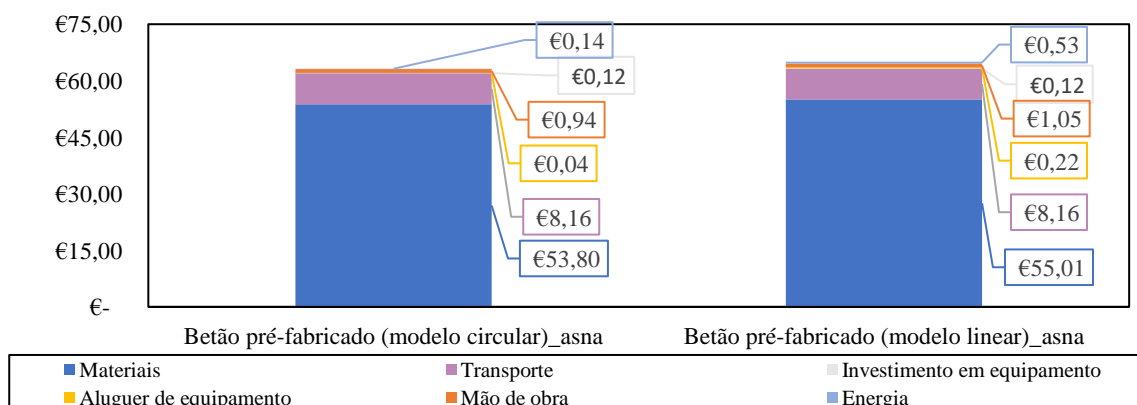


Figura 80. Distribuição dos tipos de custo do modelo linear e circular da asna por m³ de betão.

As operações do modelo circular (produção de betão pré-fabricado com cinza de cal e transporte do resíduo até ao produtor de betão) gera uma poupança de 3% face às operações do modelo linear (produção do betão pré-fabricado e deposição do resíduo em aterro) porque a cinza de cal é gratuita para a indústria do betão pré-fabricado e este poupa no custo de aquisição do filler, além disso, o produtor do resíduo poupa também com a eliminação dos custos de deposição do resíduo em aterro, gerando a desejável situação *win-win* para os envolvidos. Os custos do modelo linear e circular (Figura 79) resultam dos materiais, do transporte, do investimento em equipamento, do aluguer de equipamento, da mão de obra e da energia, como se pode ver na Figura 80.

6.2.3. Avaliação social

6.2.3.1. Pilares

As categorias de impactos sociais considerados no modelo linear e circular foram como anteriormente a dos consumidores, comunidades locais, sociedade, atores da cadeia de valor e trabalhadores. Os impactos destas categorias resultam da agregação de várias subcategorias que foram já apresentadas na Tabela 70.

Os impactos sociais do modelo linear resultam de ações do processo de produção do betão pré-fabricado com filer natural, do transporte do filer natural do produtor até ao produtor de betão, do transporte da cinza de cal do produtor até ao aterro e da deposição da cinza de cal até ao aterro. Por outro lado, os impactos sociais do modelo circular advém do processo de produção do betão pré-fabricado com cinza de cal e do transporte da cinza de cal do produtor até ao produtor do betão pré-fabricado. Na Tabela 82 e na Figura 81 mostram-se os resultados dos impactos sociais e os resultados comparativos, respectivamente, do modelo linear e circular na produção do betão pré-fabricado dos pilares.

Tabela 82 Desempenho social do ciclo de vida do modelo linear e circular do betão pré-fabricado (pilar).

| Categoria | Unidade | Betão pré-fabricado do modelo linear (pilar) | Betão pré-fabricado do modelo circular (pilar) |
|---------------------------|----------------------|---|---|
| Consumidores | Horas de risco médio | 0,049 | 0,044 |
| Comunidades locais | Horas de risco médio | 201,511 | 187,354 |
| Sociedade | Horas de risco médio | 3,480 | 3,247 |
| Atores da cadeia de valor | Horas de risco médio | 101,895 | 84,269 |
| Trabalhadores | Horas de risco médio | 150,291 | 128,694 |

De acordo com os resultados da Tabela 82 e Figura 81, o modelo circular apresenta uma redução de 11,4%, 7,0%, 6,7%, 17,3% e 14,4%, respectivamente na categoria dos consumidores, das comunidades locais, da sociedade, dos atores da cadeia de valor e dos trabalhadores, em relação ao modelo linear de produção do betão com a deposição do resíduo em aterro. O processo de produção do betão no modelo circular e linear consome os mesmos recursos, deste modo, os impactos sociais da produção de betão são idênticos, sendo a diferença de valores da Tabela 82 resultante das tarefas associadas ao modelo linear (transporte e deposição do resíduo em aterro mais o transporte do filler natural) e ao circular (apenas transporte da cinza de cal). Assim, o transporte da cinza de cal do modelo circular produz menos impactos sociais do que as tarefas do modelo linear (transporte do filler mais o da cinza de cal para deposição em aterro). Ambos os transportes têm a mesma mão de obra, mas o tempo de execução é inferior no modelo circular e, conseqüentemente, consome-se menos energia.

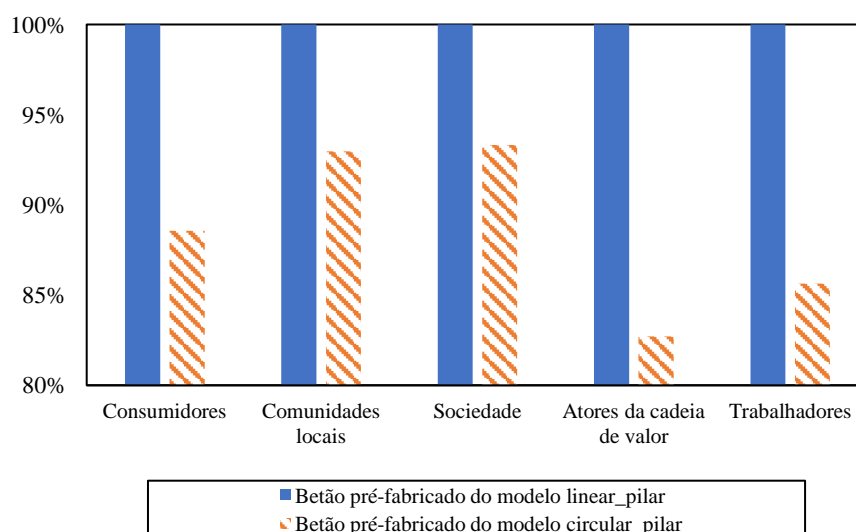


Figura 81. Melhorias sociais atingidas pelo modelo circular do pilar.

6.2.2.2. Asnas

Os impactos nas categorias de impactos sociais foram sobre as consideradas anteriormente e já apresentadas na Tabela 70. Também aqui os impactos sociais do modelo linear resultam do processo de produção do betão pré-fabricado com filler natural, do transporte do filler natural do produtor até ao produtor de betão, do transporte da cinza de cal do produtor até ao aterro e da deposição da cinza de cal até ao aterro. Os impactos sociais

do modelo circular advém do processo de produção do betão pré-fabricado com cinza de cal e do transporte da cinza de cal do produtor até ao produtor do betão pré-fabricado.

Tabela 83. Desempenho social do ciclo de vida do modelo linear e circular do betão pré-fabricado (asna).

| Categoria | Unidade | Betão pré-fabricado do modelo linear (asna) | Betão pré-fabricado do modelo circular (asna) |
|---------------------------|----------------------|--|--|
| Consumidores | Horas de risco médio | 0,052 | 0,049 |
| Comunidades locais | Horas de risco médio | 230,869 | 221,562 |
| Sociedade | Horas de risco médio | 3,840 | 3,692 |
| Atores da cadeia de valor | Horas de risco médio | 95,478 | 85,519 |
| Trabalhadores | Horas de risco médio | 151,820 | 138,985 |

Na Tabela 83 mostram-se os resultados dos impactos sociais do modelo linear e circular na produção do betão pré-fabricado da asna. De acordo com os resultados da Tabela 83 e Figura 82, o modelo circular continua apresentar uma redução de uma redução de 5,8 %, 4,0%, 3,8%, 10,4% e 8,5% respectivamente na categoria dos consumidores, das comunidades locais, da sociedade, dos atores da cadeia de valor e dos trabalhadores em relação ao modelo linear de produção do betão e deposição do resíduo em aterro.

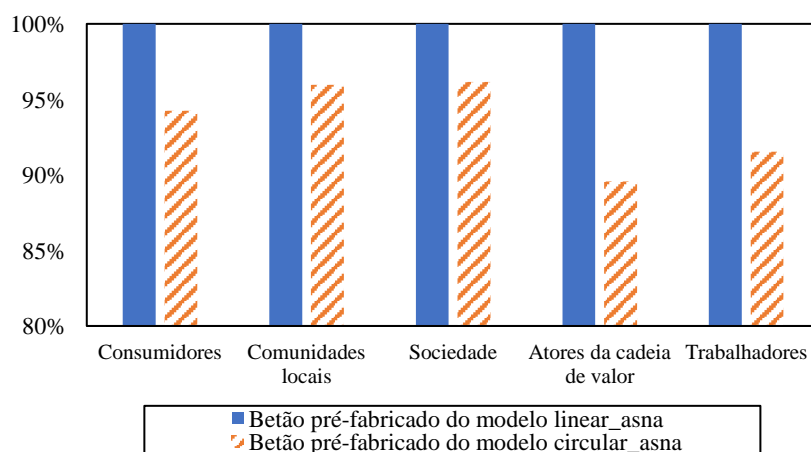


Figura 82. Melhorias sociais atingidas pelo modelo asna.

O processo de produção do betão no modelo circular e linear consome os mesmos recursos e, deste modo, os impactos sociais da produção de betão são semelhantes, resultando a diferença nos valores da Tabela 83 das tarefas associadas ao modelo linear (transporte e deposição do resíduo em aterro, mais o transporte do filler natural) e ao do

modelo circular (apenas transporte da cinza de cal). Tal como no caso da produção do betão dos pilares pela solução circular, o transporte da cinza de cal acaba por produzir menos impactos sociais do que as tarefas do modelo linear. Além disso, os transportes continuam com a mesma mão de obra, mas o tempo de execução é inferior no modelo circular e, conseqüentemente, resulta em consumo de menos energia.

Capítulo 7

Avaliação do modelo de negócio circular para as operações de valorização de resíduos

7. Avaliação do modelo de negócio circular para as operações de valorização de resíduos

Após a verificação da viabilidade técnica e da avaliação da sustentabilidade dos casos de estudo, apresenta-se neste capítulo 7 uma avaliação do modelo de negócio circular resultante da simbiose industrial entre a indústria de pasta e papel e o sector da construção, baseado nos 2 casos piloto desenvolvidos, nomeadamente, o do pavimento rodoviário e o do betão pré-fabricado, com resíduos como matérias primas alternativas.

Iniciou-se esta abordagem pela visão de mercado (*market insight*) dos potenciais clientes, de modo a recolher informação sobre as suas necessidades, problemas (“dores”), processos de compra e sobre o conhecimento da economia circular. Deste modo, a avaliação foi realizada no contexto do projeto H2020 Paperchain, onde este trabalho se enquadrou, através das respostas obtidas num questionário *online* (Tabela 84) a diferentes *stakeholders*.

Tabela 84. Inquérito online para análise sobre o conhecimento do mercado dos potenciais clientes (*stakeholders*).

| Assunto | Questão |
|------------------------------|---|
| Entrevistado | Em que sector da construção você trabalha? |
| | Compra misturas betuminosas a quente ou elementos de betão pré-fabricado? |
| | Qual é o nome da sua empresa? |
| Economia circular | Quantas iniciativas de economia circular na indústria da construção civil conhece? |
| | A sua empresa está a adotar práticas de economia circular? |
| | Atualmente, quais são as características mais importantes que procura durante compra dos seus produtos (betão pré-fabricado, mistura betuminosa, etc.)? |
| | Qual é o principal custo no fornecimento destes produtos? |
| Matérias-primas alternativas | Você considera que produtos alternativos poderiam ser um valor acrescentado? |
| | Qual seria o valor acrescentado resultante da utilização de produtos alternativos? |
| | Porquê não usa materiais alternativos? Quais são os principais problemas que enfrentou no caso de já ter comprado materiais alternativo? |
| | Um caso de demonstração na sua área ajudaria a convencê-lo a usar materiais reciclados? |
| | Que instrumento político apoiaria o uso de materiais alternativos? |

De seguida, identificaram-se as barreiras que podem condicionar a implementação do modelo de negócio, bem como, os fatores que podem torná-lo competitivo. Deste modo, as barreiras estudadas no caso dos pavimentos rodoviários e do betão pré-fabricado seguiram a metodologia proposta por vários autores (European Commission, 2016; Hart *et al.*, 2019; Pfeifer, 2017). Na Tabela 85 apresenta-se um conjunto de questões, elencadas com o intuito

de identificar as barreiras que pudessem dificultar a implementação do conceito da circularidade nos casos piloto que são a base deste estudo.

Tabela 85. Barreiras e questões associadas, de modo a eliminar os constrangimentos do caso de estudo.

| Barreira | Questão |
|--|---|
| Resíduo/ matérias-primas alternativas (SRMs) | Existe alguma norma para valorização do resíduo? |
| | Especificação de produto, ficha de dados, etc., nível de qualidade ótimo do resíduo, barreiras geográficas que afetam o processo de fornecimento do resíduo (ou seja, o fornecimento do resíduo depende da proximidade do operador de gestão de resíduos à indústria de pasta e papel (PPI)) disponível? |
| Processos | Operador de gestão do resíduo, transporte do resíduo, processo de normalização usando/transformando o resíduo, necessidade de pré-tratamento (secagem), potencial de passagem à escala industrial, adaptação do plano de investimento ao modelo de CE de recuperação de recursos, gestão na cadeia de fornecimento (fornecimento de componentes ou outros materiais), necessidade de nova tecnologia para conversão do resíduo? |
| | Novos equipamentos e infraestruturas de reciclagem para a necessidade de cenários específicos, ou adaptação das infraestruturas existentes? É necessário a digitalização? |
| Regulatória | Existe alguma mudança regulatória nas aplicações alvo e/ou aplicações atuais nos resíduos e nos materiais alternativos, durante o caso de estudo? |
| | Afeta o cenário inicial? O cenário é crítico? |
| | Futuras mudanças regulatórias e tendências políticas e sua influência nos cenários de valorização de resíduos? |
| Setorial | Políticas sobre CEMs serem aplicadas em casos específicos? |
| | O sector está preparado? |
| | Nível de confiança em soluções inovadoras e sua adaptação às premissas de mercado, força dos atuais modelos de economia linear e no futuro, instalações e infraestruturas de operação necessárias em relação ao impacto médico e de saúde no trabalho e ambiental, interesse do setor em desenvolver novos polos de pesquisa e mudanças regulatórias; o setor está ciente das novas tecnologias e do seu potencial? |
| Financeira | As novas soluções podem ser economicamente viáveis? |
| | Existem novas abordagens e tecnologias capazes de ultrapassar os constrangimentos económicos e serem competitivos? |
| | Existem modelos de negócio realistas e duráveis? Quem deve investir em quê e porquê? |
| Social/cultural | Retorno esperado para cada ator da cadeia de valor e sua evolução? |
| | Já estão implantadas novas <i>skills</i> e conhecimentos? |
| | As atividades de divulgação são implementadas para o pleno entendimento das oportunidades do setor? |
| | São adotadas novas métricas sociais/culturais reais (impacto social, medições atualizadas da pegada de CO ₂ , etc.) para uma correta comparação entre o impacto real dos modelos de negócios lineares versus os modelos circulares? |
| | Qual é a sensibilização e prontidão do público para adotar novos compromissos e os seus custos e benefícios para elaborar um quadro de políticas? |

Paralelamente ao questionário online, também foi desenvolvido um conjunto de entrevistas, com o intuito de recolher informação específica e precisa sobre cada aplicação. O objetivo das entrevistas foi o de analisar a disponibilidade dos potenciais clientes em

comprar matérias-primas alternativas (que resultam da geração de resíduos industriais) em vez das matérias-primas naturais tradicionais. Na Tabela 86 mostram-se as questões que foram colocadas aos entrevistados. Por fim, avaliou-se o panorama global do mercado (*market overview*) e o grau de replicabilidade dos casos de estudo.

Tabela 86. Guião para as entrevistas.

| Questão |
|--|
| Qual o sector da construção que trabalha? |
| Qual é sua localização? Qual é o seu mercado alvo? |
| Quais as matérias-primas alternativas ou dos materiais de construção do caso de estudo (betão pré-fabricado ou misturas betuminosas), poderia utilizar na vossa empresa? Para qual aplicação? |
| Quais são os materiais tradicionais que utilizam na produção do betão pré-fabricado e das misturas betuminosas pelo método linear? |
| Qual é a maior vantagem de usar o produto da solução linear relativamente a outros produtos disponíveis no mercado? Existem alternativas relativamente ao produto da solução linear do mercado? |
| Quais são os problemas/dificuldades do produto da solução linear que encontra hoje no seu fornecimento? |
| Quais os critérios/fatores que moldam a sua decisão de compra? Por exemplo, o preço, a disponibilidade, a confiança no fornecedor e a distância? Seria possível quantificá-los? |
| Quais são as especificações técnicas que são mais críticas? |
| Qual é o processo de tomada de decisão ao comprar/usar o produto da solução linear? |
| Qual é o processo de fornecimento em termos de frequências, volumes, embalagem e preço? |
| Qual é o vosso conhecimento sobre economia circular e o uso de matérias-primas ou produtos alternativos na vossa indústria? |
| A sua empresa está a adotar práticas de economia circular? |
| Possui pessoal qualificado em economia circular? Para implementação dum caso circular, confiaria na ajuda interna ou externa? |
| Porque é que o produto circular dos casos de estudo seria interessante para si? |
| O que o impede de usar o produto alternativo em vez do produto linear? (mencionar as exigências do processo e do investimento) Qual é a razão mais importante? |
| Quais as condições para comprar o produto da solução circular? |
| Aceitaria adquirir um material reciclado com as mesmas características técnicas a um preço mais elevado? Quanto mais gastaria em comparação com o seu preço atual? |
| Conhece uma indústria de pasta e papel (PPI) com o qual possa estabelecer uma parceria? |
| Em caso afirmativo, onde se encontra? (quantificar a distância) |
| Conhece um operador de gestão de resíduos com quem possa estabelecer uma parceria? |
| Em caso afirmativo, onde se encontra? (quantificar a distância) |
| Estaria disposto a participar num projeto europeu de demonstração, de modo a mostrar a utilização prática do material reciclado? Será que essas atividades encorajá-lo-ia a utilizar material reciclado? |

7.1. Valorização de resíduos em pavimentos rodoviários

A implementação dos modelos de negócio circulares gera um conjunto de benefícios ambientais, entre as quais a redução de emissões, a poupança de recursos e a diminuição da carga sobre o meio ambiente. Além das vantagens ambientais, os diferentes intervenientes da cadeia de valor recolhem um conjunto de vantagens económicas, nomeadamente, de redução da despesa de aquisição de matérias-primas, de mitigação da volatilidade do preços

da matéria-prima no mercado, através da reutilização e reciclagem de material, e da criação de emprego (Rizos *et al.*, 2016). Apesar das vantagens, os modelos de negócio podem ter um conjunto de constrangimentos que pode impedir a implementação das soluções circulares.

Deste modo, o caso de estudo foi avaliado pela via tecnológica e não-tecnológica. Ou seja, os desafios tecnológicos estavam associados à transformação do resíduo em matéria-prima alternativa e ao seu processo de transformação enquanto, os obstáculos não tecnológicos estavam relacionados com as questões da legislação, dos sectores, do financiamento, mercado e da cultura/social.

Os *dregs* e os *grits* são classificados como resíduos não perigosos e são catalogados pelo código 03 03 02 da Lista Europeia do Resíduo (CE, 2014a). Como atrás referido, os *dregs* são gerados durante a clarificação do licor verde e contém material insolúvel do fluxo inorgânico da caldeira de recuperação (fundido) enquanto, os *grits* são o material removido da descarga do apagador de cal para evitar a acumulação em materiais causticizantes e o desgaste mecânico nos componentes do filtro (Modolo *et al.*, 2010; R. Modolo *et al.*, 2014; Quina e Pinheiro, 2020; Ribeiro dos Santos *et al.*, 2019).

Enquanto no modelo de produção e consumo linear atual, estes resíduos são maioritariamente encaminhados para a deposição em aterros, no modelo circular perspetiva-se antes a sua reutilização ou reciclagem como matérias primas alternativas às naturais no mesmo ou em outros setores industriais. Para tal existem aspetos críticos a considerar nos resíduos como a distribuição de tamanho de partículas, o seu teor de humidade, o transporte e o ajuste na substituição do agregado da mistura betuminosa. O sucesso do caso de estudo pode estar condicionado ou pela distância do transporte ou pela etapa de secagem no pré-tratamento, devido por exemplo à duração de secagem e aos custos associados.

Relativamente à barreira do resíduo enquanto matéria-prima alternativa, os *dregs* e os *grits* não apresentam componentes tóxicos que impeçam a incorporação em misturas betuminosas, no entanto, os *dregs* têm, por exemplo, um alto teor de sais solúveis. Deste modo, a incorporação direta dos *dregs* e dos *grits* é limitada mas pode ir até 4% e 10%, respetivamente, sem afetar as propriedades finais da mistura betuminosa (Modolo *et al.*, 2010). Outro aspeto crítico é o teor de humidade inicial dos *grits* (16%) e dos *dregs* (40%) que excede o máximo admissível para agregados nestas misturas betuminosas. Consequentemente, os resíduos necessitam de um pré-tratamento (secagem e desagregação),

antes de serem incorporados no produto final. Os resultados da Figura 26 mostraram que os resíduos têm uma distribuição semelhante ao pó de calcário (0/4) após o pré-tratamento.

Além disso, o processo de secagem dos resíduos ocorreu numa estufa solar, o que permitiu reduzir muito os consumos energéticos e as emissões de CO₂ relativamente a processos de secagem térmica convencional. Aqui os *grits* e os *dregs* necessitaram de 4 e 6 semanas para atingir 1.5 % e 10 % de humidade, respetivamente. Esta fase do pré-tratamento pode condicionar a implementação do modelo de negócio, devido aos custos acumulativos da utilização da estufa solar, da energia e tempo de secagem, bem como do transporte dos resíduos.

Ao nível da legislação, não existe uma regulamentação específica para o uso dos *dregs* e dos *grits* nas misturas betuminosas. Apenas existe a norma de produto, que define os requisitos para agregados (EN 13043) e para misturas betuminosas do tipo *asphalt concrete* (EN 13108-1). Contudo, a aplicação desta valorização à escala industrial em Portugal requer uma licença ambiental para a implementação do caso de estudo. A obtenção da licença é fatigante, longa e onerosa (até 5000€ por licença) e, previamente à comercialização do produto, o resíduo deve obter o estatuto de subproduto para não obedecer à legislação associada ao resíduo, mas este processo de desclassificação é longo e requer o pagamento de outra taxa de desclassificação do resíduo (cerca de 6030€).

Do ponto de vista setorial, os resíduos não podem ser introduzidos em misturas betuminosas, a menos que seja efetuado o pré-tratamento (secagem e peneiração). Este processo requer um esforço adicional (tempo e custo), de modo a encontrar a unidade de secagem adequada. Por outro lado, o setor da construção usa matérias-primas baratas com preços difíceis de competir e, ao mesmo tempo, o setor é conservativo em modificar o processo produtivo, a menos que as vantagens da nova solução sejam superiores à solução tradicional. Deste modo, os *players* aceitam os resíduos, desde que estejam asseguradas a qualidade dos materiais (certificação), fornecimento regular e um preço menor, comparativamente à matéria-prima natural. Uma estratégia para combater os custos adicionais, passa pela proximidade dos novos clientes dos resíduos das PPI (indústrias de pasta e papel), de modo a evitar elevados fretes de transportes.

Pela via financeira, identificaram-se os custos associados ao pré-tratamento, bem como, o custo de transporte dos resíduos. Além disso, a aceitação da nova solução pelo mercado está condicionada à existência de vários fornecedores de matérias-primas naturais, que as

comercializam para já a um preço competitivo, difícil de ultrapassar. Por outro lado, os resíduos não recebem incentivos financeiros e não têm o estatuto de fim de vida para serem usados como agregados em misturas betuminosas. Este processo de desclassificação do resíduo requer tempo e recursos e atrasará a aceitação do mercado pela nova solução.

Por fim, ao nível social e cultural, o processo de pré-tratamento associado gera desconfiança e resistência dos clientes sobre as novas matérias-primas alternativas. Além disso, existe uma cadeia de fornecimento robusta que dificulta a instalação de novas soluções. Após o processo de desclassificação do resíduo, o consumidor final poderia alterar o pensamento sobre estes materiais e, conseqüentemente, a cadeia de valor poderia alterar a sua imagem ambiental, devido à redução da deposição dos resíduos em aterro e do consumo de agregados naturais. Contudo, esta alteração precisaria de algo como um rótulo ecológico associado ao produto de modo a persuadir a opinião pública na sociedade e alterar o padrão de consumo de recursos.

Na Tabela 87 resumam-se as barreiras que apareceram na abordagem feita à implementação do modelo circular dos *dregs* e dos *grits* como agregados alternativos na produção de misturas betuminosas.

Os resultados da análise da visão de mercado (*market insight*) dos potenciais clientes resultam de duas entrevistas (pelo guião da Tabela 86) e de treze respostas do questionário online (Tabela 84), de modo a avaliar o interesse dos potenciais clientes em aplicar materiais primas secundárias em vez dos matérias-primas tradicionais. Ao nível das entrevistas, as características das empresas envolvidas eram as seguintes:

- ✓ Empresa 1: opera em 5 continentes abrangendo mais de 40 países. Tem mais de 100 anos de experiência em projeto, construção, operação e manutenção de infraestruturas de engenharia civil, tais como estradas, autoestradas, pontes, túneis, etc. É um dos principais detentores de participações na cadeia de valor da indústria da Construção.
- ✓ Empresa 2: opera no projeto, construção e manutenção de estradas, das quais algumas de grande importância, tais como autoestradas e vias com tráfego pesado. A empresa opera principalmente no País Basco (e algumas áreas do norte de Espanha) e tem algumas subsidiárias e uma empresa portuguesa associada para obras nesse país. A empresa atua em todas as obras de construção e manutenção de estradas: projeto, escavação, aterro e trabalhos de pavimentação, etc. Possui instalação própria para

produzir produtos betuminosos. Além disso, consomem volumes consideráveis de betão pronto e betão pré-fabricado nas suas construções. Na maioria das obras civis a empresa está aberta a empregar SRMs em vez de recursos naturais, sempre que funcionem adequadamente e sejam competitivos, especialmente para grandes obras. Esta empresa tem como o foco uso de *grits* como agregados para misturas betuminosas e lama de cal (para substituição do cimento), WPFA (para cimentos que sejam utilizados na estabilização de solos) e *dregs* secos como agregados em camadas de misturas betuminosas.

Tabela 87. Barreiras na utilização de *dregs* e de *grits* nas misturas betuminosas (MB).

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor da MB) | Avaliação |
|-----------------------|---|---|---|---|
| Tecnológica | | | | |
| Resíduo | <i>Dregs</i> e <i>grits</i> são classificados como resíduos não perigosos. | Qualidade dos SRMs (Secondary Raw Materials) deve ser garantida, uma vez que exista uma clara restrição à sua utilização na aplicação dos pavimentos rodoviários. | Falta de controlo na qualidade dos SRM pode arruinar o produto betuminoso, devido excesso de sais e de humidade. | Excesso de sais solúveis (<i>dregs</i>) e humidade (<i>dregs</i> e <i>grits</i>). Pré-tratamento dos resíduos é necessário. |
| | Excesso de sais solúveis nos <i>dregs</i> , necessidade de pré-tratamento. | Manuseamento e transporte dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> como resíduos não perigosos (licenças e camiões específicos). | Novas misturas betuminosas devem atingir os requisitos das normas de produto. O produto final deve garantir um desempenho adequado a longo prazo e nenhum problema ambiental devido ao potencial de lixiviação de sais solúveis existentes nos agregados. | |
| | <i>Grits</i> necessitam de pré-tratamento (secagem e peneiração). | Remoção do excesso de sais (por lavagem) e secagem é necessária para alcançar a qualidade requerida como agregados: energia e tempo consumidos, e necessidade de instalações de secagem, mais, transporte para instalações. | Disponibilidade contínua de pré-tratamento nos SRMs é necessária na construção de pavimentos rodoviários. | |
| | Excesso de humidade nos <i>dregs</i> e nos <i>grits</i> . | | | |
| Processo | <i>Dregs</i> e <i>grits</i> são resíduos não perigosos. Limitações no manuseamento e armazenamento. | Excesso de sais deve ser removida pelo pré-tratamento dos resíduos, baseado no processo de lavagem e de secagem. Operação consome energia, espaço e tempo. As garantias sobre a qualidade dos SRM e sua certificação são pontos críticos. | <i>Dregs</i> e <i>Grits</i> alcançando a qualidade requerida podem substituir totalmente o filler nas misturas betuminosas. Mas um mau pré-tratamento pode dificultar ou impedir a introdução de SRMs em novas misturas. Qualidade deve ser garantida. | Desempenho do Processo de lavagem e de secagem. |
| | <i>Dregs</i> e <i>grits</i> necessitam de pré-tratamento. | Disponibilidade contínua de SRMs pode ser um desafio. | | Disponibilidade dos agregados. |
| | São necessárias instalações externas. | O sucesso do pré-tratamento, condiciona a qualidade dos SRMs e limita o potencial de substituição na mistura. | | |

Tabela 87. (Continuação) Barreiras na utilização de *dregs* e de *grits* nas misturas betuminosas (MB).

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor da MB) | Avaliação |
|------------------------|--|---|--|---|
| Não-Tecnológica | | | | |
| Regulatória | Classificação dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> como resíduo não perigoso em vez de subproduto complica o processo de valorização. | Falta de legislação específica e normas sobre o uso dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> como filler nas misturas betuminosas de Portugal e da EU. | Falta de legislação específica e normas sobre o uso dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> como filler nas misturas betuminosas de Portugal e da EU. | Falta de legislação específica e normas sobre o uso dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> como filler nas misturas betuminosas de Portugal e da EU. |
| | Classificado como resíduo não perigoso significa mais limitações para transporte, armazenamento, etc., bem como, mais controlos ambientais. <i>Dregs</i> e <i>grits</i> podem ser depositados em aterro. | Resíduo não perigoso significa mais limitações para transporte, armazenamento, etc., bem como, mais controlos ambientais. | Variações no quadro regulamentar de uma região/país sobre o tipo de resíduos que são permitidos, bem como, o procedimento de aplicação. Inexistência de obrigação legal para incluir qualquer percentagem de incorporação de <i>dregs</i> e de <i>grits</i> nos trabalhos de construção. | |
| Setorial | Modelo de produção e os trabalhadores não são usados para trabalhar com os <i>dregs</i> e <i>grits</i> como potenciais SRMs e podem não ter consciência do seu valor como SRMs em vez dos resíduos. A mudança de mentalidade seria necessária. | Trabalhadores não são utilizados para tratar <i>Dregs</i> e <i>Grits</i> como potenciais SRMs (Secondary Raw Materials), em vez de resíduos. | Alterações no fornecimento introduzem mudanças operacionais que os trabalhadores não estão habituados. Deste modo, a produtividade pode decrescer no período inicial. | Complexidade e custos de pré-tratamento dos resíduos pode ser um obstáculo. |
| | Novas competências em relação ao pré-tratamento dos materiais, melhorando a qualidade dos resíduos e a sua gestão. | São necessárias alterações na organização e no processo produtivo para obter o pré-tratamento dos resíduos (lavagem, secagem), gestão das águas residuais e monitorização da qualidade. Novas competências em relação ao pré-tratamento dos materiais, e à sua gestão. | Setor conservativo que trabalho com processos bem consolidados. Incerteza na qualidade dos agregados e desempenho técnico a longo prazo e ambiental, bem como, a falta de regulamentos específicos. Desconfiança geral nos <i>dregs</i> e <i>Grits</i> . Falta de provas sólidas à escala industrial. | Incerteza na qualidade dos agregados e desempenho técnico a longo prazo e ambiental, bem como, a falta de regulamentos específicos. |

Tabela 87. (Continuação) Barreiras na utilização de *dregs* e de *grits* nas misturas betuminosas (MB).

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor da MB) | Avaliação |
|-----------------------|---|---|--|---|
| Financeira | Controlo de qualidade dos resíduos e custos de pré-tratamento dos resíduos (lavagem e secagem) aumentam o custo final do produto e reduz a margem de lucro. | Necessário tratamento dos resíduos, licenças de gestão, novas instalações, controlo e custos associados, tais como transporte. Encontrar novas tecnologias de tratamento mais baratas e acordos a longo prazo entre os atores da cadeia de valor, de modo a criar agregados competitivos. | Setor muito competitivo. Os processos de construção estão bem consolidados. Além disso, as matérias-primas naturais são baratas e de alta qualidade na maioria dos países europeus, como em Portugal. Novos agregados não supõem um ganho económico para o utilizador final, no contexto atual. | Preços competitivos não são garantidos pelo novo processo. Um bom acordo financeiro e de trabalho em rede é necessário para a viabilidade do processo de valorização. |
| | Custos de deposição dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> em aterro como um facilitador. | Distâncias entre a produção de resíduos, local de tratamento e o local de aplicação. Os custos de transporte e o balanço da pegada de carbono podem ser negativos em relação aos materiais de referência. | Os materiais tradicionais são mais baratos e os novos materiais que incorporem SRMs têm baixa utilização. Os preços baixos e os custos de tratamento podem ser um risco para viabilidade económica dos novos produtos, a menos que existam vantagens claras ou o desempenho possa ser obtido (não é o caso). Os custos dos agregados do caso de estudo são mais altos do que os agregados naturais. A negociação entre o produtor e o gestor de resíduos e o aplicador pode fixar um preço adequado ao longo de toda a cadeia de valor para permitir a aceitação do mercado. | |
| | | Concorrência: matérias-primas naturais e alternativas são mais baratas. | Falta de incentivos financeiros de valorização ou “asfaltos verdes” traduzidos em vantagem financeira. | |

Tabela 87. (Continuação) Barreiras na utilização de *dregs* e de *grits* nas misturas betuminosas (MB).

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor da MB) | Avaliação |
|-----------------------|---|--|---|--|
| Financeira | | | Alguns produtores de misturas betuminosas podem recusar-se a experimentar <i>dregs</i> e <i>grits</i> como agregados, a menos que as incertezas sobre sua qualidade e desempenho a longo prazo sejam claras. | |
| Social/cultural | <p>Não foram identificadas resistências internas.</p> <hr/> <p>Resíduos não valorizados como matéria-prima rentável pelos trabalhadores.</p> <hr/> <p>Redução da pegada ambiental e marketing positivo para o produtor.</p> | Os trabalhadores precisam mudar os procedimentos usuais e os modelos de gestão para melhorar a rede da cadeia de valor e incorporar novas aptidões no novo processo do tratamento de resíduos. | <p>Clientes, Governo e Público podem perceber os <i>Dregs</i> e <i>Grits</i> como um risco ambiental devido à sua origem como resíduo e não confiar no desempenho técnico e ambiental; Evidências mais confiáveis (eventos de demonstração) devem ser geradas.</p> <hr/> <p>Rotulagem de “asfalto verde” poderia ajudar evitar a recusa na aplicação de resíduos no processo construtivo. Os principais benefícios do uso de SRMs devem ser divulgados.</p> | A rotulagem “asfalto verde” pode ajudar a reduzir a recusa em empregar resíduos na construção. |

As respostas das entrevistas mostraram que a escolha das novas soluções face às soluções atuais está condicionada pelo preço, pela proximidade no fornecimento (distância) e pela informação sobre o desempenho da nova solução. Em suma, a robusta cadeia de abastecimento da solução tradicional é uma das principais barreiras de entrada de novas soluções (misturas betuminosas com *dregs* e *grits*).

Relativamente ao processo de tomada de decisão, a escolha das novas soluções está condicionada pelo preço e pela disponibilidade de abastecimento. Contudo, as empresas estão atentas à necessidade de redução do impacto ambiental das suas aplicações, mas a aplicação dos materiais alternativos, em estradas, está longe de ser uma prática comum. Pode-se ver por algumas das citações mais comuns, tais como:

- “Preço e disponibilidade. Distância é um problema, se o preço e o tempo aumentarem.”
- “Nós produzimos a mistura, de acordo com os requisitos dos clientes.”
- “Boa relação entre preço e qualidade.”
- “Os nossos critérios de valor (do mais alto para o mais baixo) são preço, distância e confiança.”
- “Cadeia do valor linear, emissões de CO₂ e custo de matérias-primas.”
- “Emissões de CO₂, modelo de economia linear”.

Pela análise técnica, a certificação é um aspeto crítico, ou seja, os produtos de construção devem ser certificados com a marcação CE e, adicionalmente, a qualidade ambiental do produto deve ser assegurada e cumprir com os requisitos dos clientes.

A tomada de decisão está condicionada pela capacidade de negociação dos fornecedores, ou seja, os gestores de projetos ou os gestores de fornecimento são responsáveis pela identificação da melhor solução, de acordo com os fatores previamente identificados (disponibilidade, preço e tempo de fornecimento).

Do ponto de vista do conhecimento sobre a economia circular, os entrevistados estão familiarizados com o conceito de economia circular, mas é mais provável que utilizem agregados de betão reciclado para a fundação das estradas do que a substituição por outros resíduos. Além disso, alguns afirmaram estar familiarizados com iniciativas de economia circular que apenas foram implementadas na fase de investigação e desenvolvimento. Contudo, não conseguem encontrar soluções idênticas ao do caso de estudo, no setor

rodoviário. Em suma, os entrevistados mencionaram algumas iniciativas de economia circular como:

- “Está na nossa agenda. Nós estamos envolvidos em vários projetos de investigação e de aplicação. Não somos especialistas, mas tentamos usar matérias-primas alternativas e/ou recicladas, tais como solos escavados e rochas, RCD, escórias de alto forno (EAF), em vários troços. O uso de produtos alternativos provenientes de resíduos industriais ainda não está muito difundido, como sabemos.”
- “Nós ouvimos falar da utilização de cinzas volantes no fabrico de cimento, mas não ouvimos falar da substituição do cimento por este.”
- “É novo, mas interessante.”
- “É bastante popular usar agregado de betão reciclado para fundação de estradas. Este é o único material secundário difundido.”

A transição para o uso contínuo de materiais alternativos necessita de algumas adaptações na logística, nomeadamente, no armazenamento, bem como, na criação de um gabinete dedicado à economia circular nas empresas.

Relativamente à aceitação do mercado, têm uma posição bastante defensiva referindo que os clientes necessitam de garantias sobre a qualidade dos materiais (certificação), o custo de utilização deve ser baixo, a solução ser amiga do ambiente (rotulagem), e deve garantir benefícios diretos e indiretos para a empresa. Por outro lado, a utilização de materiais alternativos não pode exigir mais investimento no processo produtivo (transporte, equipamento) e deve satisfazer os requisitos dos clientes.

Por fim, os entrevistados foram questionados sobre a viabilidade de adquirir um material reciclado com as mesmas características técnicas a um preço superior. Ambos afirmam que o compromisso da empresa com o meio ambiente é importante, mas o preço dos materiais alternativos não pode ser muito superior ao dos materiais tradicionais.

Passando à análise do panorama geral do mercado (*market overview*), a maioria das empresas confirmaram que usavam os agregados naturais na construção de rodovias, nomeadamente, agregados naturais ou de cimento. Quando eram questionadas sobre o potencial de utilização do caso de estudo (Tabela 31), mostravam incerteza sobre a utilização dos resíduos em misturas betuminosas. Esta indecisão resultava da forte cadeia de fornecimento de agregados naturais que impede a implementação de novas soluções. Apesar

deste constrangimento, as empresas mostraram interesse por novos produtos alternativos à construção de estradas.

Na opinião dos *stakeholders*, as novas soluções devem ser certificadas e os custos globais da utilização das soluções devem ser inferiores ao dos materiais convencionais. Além disso, os resíduos devem estar armazenados e valorizados de forma correta, de modo a evitar qualquer esforço adicional de atualização do processo produtivo.

Inicialmente, a condicionante está no processo de desclassificação do resíduo, ou seja, sem esse passo os resíduos não podem ser comercializados como matéria-prima alternativa e o modelo de negócio circular não pode ser executado. Após o processo de desclassificação dos resíduos, o processo de abastecimento é condicionado pelas barreiras geográficas (distância, empresas) que irá condicionar a viabilidade econômica da solução desenvolvida. Assim, seria necessário encontrar a distância limite que não comprometesse a comercialização da solução.

A adoção deste modelo circular pelos vários agentes (produtor do resíduo, operador de gestão de resíduos e consumidor final) mostra uma imagem mais “verde” das empresas utilizadoras, mesmo que o preço final da nova solução não gere ganhos competitivos, devido ao custo baixo dos agregados tradicionais. Apesar disso, os vários intervenientes reconhecem que no modelo circular beneficiam de vantagens qualitativas, nomeadamente:

- Produtor do resíduo – evita a deposição do resíduo em aterro e reduz os custos de deposição. Além disso, beneficia de uma imagem pública como promotor da economia circular;
- Operador de gestão de resíduos – atrai novos clientes do setor da construção;
- Consumidor final (setor da construção) – usufrui de um subproduto alternativo em vez dos recursos naturais, bem como, a imagem pública associada à sustentabilidade.

Por fim, os concorrentes são os atuais fornecedores existentes de matérias-primas naturais e os futuros clientes são os operadores de gestão de resíduos e as empresas de construção de infraestruturas rodoviárias. Se os atuais fornecedores de matérias primas tradicionais virem os resíduos como uma matéria prima alternativa, a percepção da sua vantagem poderia facilitar a inserção no mercado destes resíduos como tais.

Em termos da replicação do modelo de negócio, analisou-se a adoção do caso de estudo por outros intervenientes (outras indústrias) e a análise *SWOT* que identifica as forças, oportunidades, fraquezas e ameaças, está patente na Tabela 88.

Tabela 88. Análise SWOT do caso de estudo (misturas betuminosas e betão pré-fabricado).

| Forças | Oportunidades | Fraquezas | Ameaças |
|--|--|--|--|
| Produtor de pasta e papel tem várias unidades industriais espalhadas no território português, ou seja, fácil replicação do caso de estudo. | Aumento da procura pela sociedade e consumidores sobre a valorização de resíduos, economia circular, sustentabilidade ou produtos verdes. | Necessidade de negociação no acordo de exploração com operador de gestão de resíduos, que deve ter em conta os custos. | Falta de apoio do governo, nomeadamente sobre o processo de desclassificação do resíduo. |
| Melhora o desempenho técnico e ambiental do produto final que incorpora agregados alternativos. | Alteração da designação resíduo para matéria prima podia acelerar a produção e a comercialização de misturas betuminosas com <i>dregs</i> e com <i>grits</i> , como pavimento verde. | Necessidade de tempo para negociar o acordo de exploração e de propriedade entre os diferentes intervenientes. | Incerteza sobre a disponibilidade contínua do resíduo como matéria-prima alternativa. |
| Produtor de pasta e papel tem um grande conhecimento sobre a valorização de resíduos, de modo a converter em novos materiais. | Ganhos ambientais, melhoria da eficiência de recursos, através da reutilização, reciclagem, e redução do consumo de matérias-primas virgens e baixa pegada de carbono. | Cadeia de fornecimento local é necessário para reduzir os custos de transporte, bem como, as emissões. | Altos custos no tratamento e transporte dos resíduos. |
| Produtos verdes podem abrir o caminho da certificação verde. | Desenvolvimento dos processos locais e da economia. | Tratamentos adicionais requer custos adicionais. | Custos adicionais na monitorização da qualidade ambiental. |
| Uma rede de trabalho entre os diferentes intervenientes da cadeia de valor (incluindo universidades, indústria e organismos públicos, etc. | Crescimento das indústrias que aplicam e promovem um perfil mais verde. | Concorrência, ou seja, os agregados naturais são mais baratos do que agregados alternativos. | Um inadequado quadro regulamentar para desclassificar o resíduo. |
| Produtor de pasta e papel tem uma presença internacional (subsidiárias comerciais). | Acesso a concursos públicos que utilizem o critério das compras ecológicas. | Segundo a perspetiva do cliente sobre as matérias-primas alternativas: - Os custos dos novos materiais (resíduos valorizados são mais altos do que as soluções tradicionais. - Inexistência da legislação que regule o uso dos <i>dregs</i> e dos <i>grits</i> no setor da construção. - Desconfiança sobre a qualidade dos materiais alternativos, especialmente os <i>dregs</i> . - Aceitabilidade do mercado. | Falta de suporte regulamentar e incentivos (na forma de taxas ou suporte financeiro) ao nível nacional para produtos da construção com resíduos. |

Tabela 88. (Continuação) Análise *SWOT* do caso de estudo (misturas betuminosas e betão pré-fabricado).

| Forças | Oportunidades | Fraquezas | Ameaças |
|--------|---|--|--|
| | Adoção de modelos de economia circular pelas indústrias da construção na economia circular. | O setor da construção é geralmente relutante sobre as soluções inovadoras. | Falta de sistemas/ tecnologia, ou seja, continuam a existir barreiras técnicas que impedem a implementação de soluções circulares. |
| | Legislação nacional tem aumentado as taxas de deposição dos resíduos em aterro. | | Alto nível de concorrência (direta e indireta) no setor da construção, ou seja, o setor procura inovação em matérias-primas alternativas provenientes dos recursos naturais. |
| | | | Uma má experiência no passado pode condicionar aplicação dos novos materiais pelos clientes. |
| | | | Não existe legislação específica que abranja produtos inovadores, incluindo SRMs. |

Numa unidade de produção de pasta e papel (PPI), a geração dos *dregs* e *grits* produz cerca de 2455 t e 2040 t, com 50% e 20% de humidade (ou seja, resíduos que contém água), respetivamente. Após o processo de pré-tratamento (secagem), a humidade dos *dregs* decresce até 10% e 1% para *grits*, dando origem a 1350t de *dregs* e 1652 t de *grits*. Deste modo, usando o teor de substituição do caso de estudo (4%), os resíduos dariam para produzir 79000 t de mistura betuminosa. Ou seja, o produto final de uma unidade de produção de pasta seria esgotado numa extensão de estrada com 92 km de comprimento, 7 m de largura e 5 cm de espessura. No entanto, este consumo está condicionado pela obtenção da autorização legal para desclassificação do resíduo, como subproduto. Se a licença for emitida de forma menos onerosa e rápida, o sucesso da replicabilidade pode estar garantido.

Por outro lado, o fator que influencia o custo dos agregados naturais do mercado das misturas betuminosas é o seu transporte, devido às grandes quantidades de material que devem ser transportados pelo camião até ao local de produção. Contudo, a situação dos *dregs* e *grits* é mais complicada que outros resíduos, porque necessita de pré-tratamento que lhes aumenta o custo inicial a que chegam ao mercado. No modelo linear, a indústria dos betuminosos compra o pó de calcário a 78 km da sua unidade e gasta 0,11€/km/t (incluindo

custo do agregado mais transporte). No modelo circular, a indústria de pasta e papel gasta 0,13€/km/t para a deposição do resíduo sem pré-tratamento em aterro. Atualmente, as empresas de construção estão a aceitar o preço do agregado natural a 78km de distância e, utilizando a relação de custo entre agregados naturais e resíduos (*dregs* e *grits*), o raio de distância equivalente permitido seria de cerca de 65 km para efetivar o modelo de negócio circular. Contudo, os produtores dos resíduos teriam de pagar as operações de pré-tratamento ao operador de gestão de resíduos sem exceder o valor atual da deposição do resíduo em aterro (35€ *per ton*).

7.2. Valorização de resíduos em betão pré-fabricado

Tal como no anterior caso piloto também este foi analisado com questões de natureza tecnológica e não-tecnológica. Como referido, os desafios tecnológicos estavam relacionados com a transformação do resíduo em matéria-prima alternativa e com o seu processo de transformação enquanto os desafios não tecnológicos estavam ligados a questões de legislação, de sectores, de financiamento/mercado e de cultura/social.

No modelo linear, a cinza de cal é composta principalmente por carbonato de cálcio (CaCO_3) (Modolo *et al.*, 2014; Qin *et al.*, 2015) e é catalogada pelo código LER 03 03 09 da Lista Europeia do Resíduo. Está classificada como resíduo não perigoso (CE, 2014a) e para a promover um modelo de produção circular, a cinza de cal foi usada como filler na produção de betão pré-fabricado.

Para que o resíduo possa ser uma matéria-prima alternativa, deve comparar-se com o filler calcário natural apresentando uma humidade próxima de zero e uma distribuição de partícula que deve ser pelo menos de 70% e 85% nos peneiros de 63 e 125 μm , respetivamente. Os resultados da Figura 48 mostraram já que a cinza de cal obedece ao limite granulométrico do filler natural e que a sua humidade inicial é menor que 1%. Assim, o resíduo não necessita de nenhum pré-tratamento realizado pelo produtor do resíduo.

Analogamente, o processo de incorporação do resíduo no betão não altera o funcionamento do sistema produtivo do produtor do betão pré-fabricado. Além disso, o transporte do resíduo pode ser realizado por um operador de gestão de resíduos, num camião cisterna, de modo a enviar o resíduo diretamente para o silo na linha de produção do betão.

Ao nível da legislação, não existe uma regulamentação específica para o uso da cinza de cal no betão pré-fabricado. Contudo, a aplicação desta valorização à escala industrial, em Portugal, requer ainda uma licença ambiental para implementação do caso de estudo. Tal como no outro caso piloto, a obtenção da licença é um processo fatigante, longo e oneroso (até 5000€ por licença) e previamente à comercialização do produto, o resíduo deverá ter o estatuto de subproduto para não obedecer à legislação associada ao resíduo, mas este processo de desclassificação é longo e requer o pagamento da taxa de desclassificação do resíduo ($\approx 6030\text{€}$).

Do ponto de vista sectorial, a valorização da cinza de cal não apresenta nenhum desafio técnico inatingível para o uso pretendido. Além disso, a cinza de cal pode substituir totalmente o filler natural, sem se alterar a restante formulação do betão, devendo apenas estar seca para ser transportada num camião-cisterna pelo operador de gestão de resíduos. Uma barreira eventual pode ser a resistência à mudança dos *players* do sector, para usarem um resíduo em vez dos recursos naturais.

Pelo lado financeiro, identificam-se os custos associados ao transporte e armazenamento da cinza de cal, mas tem a vantagem de não ser necessário alterar o processo de produção do betão para se valorizar o resíduo. As matérias-primas naturais como os agregados e filleres têm neste sector ainda grande disponibilidade e os preços de aquisição são baixos, bem como as taxas de deposição dos resíduos em aterro. Por isso, o resíduo é ainda frequentemente depositado em aterro e, também, não existem incentivos económicos para se usar matérias-primas alternativas.

Por fim, ao nível social ou cultural, não existiu resistência social (interna ou externa) à implementação do caso de estudo. Por outro lado, a criação de um rótulo verde associado ao produto final poderia aqui acrescentar valor à imagem do produto e, conseqüentemente, facilitar a entrada em novos mercados.

Na Tabela 89 apresentam-se o conjunto de questões levantadas em cada barreira, de modo a identificar as barreiras existentes que podem impedir a implementação da valorização da cinza de cal no betão pré-fabricado.

Tabela 89. Barreiras na utilização da cinza de cal no betão pré-fabricado.

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor de betão pré-fabricado) | Avaliação | |
|-----------------------|---|--|---|--|--|
| Tecnológica | Cinza de cal é classificada como um resíduo. | Armazenamento da cinza de cal requer condições específicas para mantê-la seca. | A falta de controlo na humidade da cinza de cal, bem como, o manuseio incorreto pode arruinar a produção de betão pré-fabricado. | Continuar com a humidade da cinza de cal abaixo de 1%. | |
| | Composição da cinza de cal tem carbonato de cálcio (CaCO ₃). Além disso, o código LER é 03 03 09 e é classificado como resíduo não perigoso (decisão n° 2014/955). Por outro lado, está livre de qualquer contaminante e a sua variabilidade química é aceitável. | | | Desconfiança no uso de resíduos como SRM necessita de um controlo de qualidade e da garantia de qualidade. | Disponibilidade de produção próxima do local de aplicação. |
| | Humidade é inferior 1% e a indústria do betão pré-fabricado usa filleres com humidade aproximada de zero. Além disso, as partículas do filler têm pelo menos 70 e 85% no peneiro abaixo de 63 µm e 125 µm, respetivamente. | Transporte deve ser realizado por camiões-cisternas que aumentam os custos. | | | |
| Resíduo | Deposição do resíduo em aterro é permitida. | | Os resultados dos ensaios no betão devem ser aquedados, de modo a garantir uma resistência mecânica e uma dureza superficial adequada. Além disso, devem evitar corrosão, eflorescências, garantindo a durabilidade física e química. | | |
| | | | Disponibilidade de produção e a cinza de cal próxima das instalações do betão pré-fabricado. | | |

Tabela 89. (Continuação) Barreiras na utilização da cinza de cal no betão pré-fabricado.

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor de betão pré-fabricado) | Avaliação |
|------------------------|---|--|---|---|
| Processo | Armazenamento da cinza de cal deve ser mantido seco. | Logística/ transporte da cinza de cal deve ser considerada pela condição de ser resíduo. Além disso, o transporte deve ser feito por um camião-cisterna, através de um operador de gestão de resíduo e, conseqüentemente os custos aumentam. | Questões não relevantes para a produção de betão como facilitador. “Negócios, continua igual”. | A cinza de cal deve estar no estado seco, de modo a realizar a gestão e o transporte da cinza de cal. |
| | | Processo de valorização não precisa de nenhuma modificação (equipamentos ou competências adicionais). Mudanças organizacionais no produtor de resíduo. | Armazenamento e transporte de cinzas de cal (seco). | Nenhuma modificação substancial no processo |
| Não-Tecnológica | | | | |
| Regulatória | Cinza de cal é classificada como resíduo não perigoso, em vez de subproduto. | Falta de regulamentação em Portugal e na União Europeia, onde a cinza de cal tem potencial para ser utilizada como filler no betão pré-fabricado. | Falta de regulamentação em Portugal e na União Europeia, onde a cinza de cal tem potencial para ser utilizada como filler no betão pré-fabricado. | Falta de regulamentação em Portugal e na União Europeia, onde a cinza de cal tem potencial para ser utilizada como filler no betão pré-fabricado. |
| | Condiciona as condições de armazenamento e transporte/licenciamento. | Processo complexo na obtenção de licenças a nível nacional para facilitar atividades de demonstração baseadas na valorização de resíduos. Ou seja, o processo consome tempo e é dispendioso. | Processo complexo na obtenção de licenças a nível nacional para facilitar atividades de demonstração baseadas na valorização de resíduos. Ou seja, o processo consome tempo e é dispendioso | |
| | Falta de apoio regulamentar e incentivos a nível nacional para a valorização das cinzas de cal em produtos de construção. | Licenças na gestão e transporte de resíduos. | | Cinza de cal é classificada como resíduo não perigoso, em vez de subproduto. |
| | Deposição da cinza de cal em aterro é permitida. | | | Processo complexo na obtenção de licenças a nível nacional para facilitar atividades de demonstração. |

Tabela 89. (Continuação) Barreiras na utilização da cinza de cal no betão pré-fabricado.

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor de betão pré-fabricado) | Avaliação |
|-----------------------|---|---|--|---|
| Setorial | Desconfiança do sector, devido à classificação da cinza de cal como resíduo. | Desafios organizacionais e tecnológicos são alcançáveis, mas devem competir com o ambiente muito competitivo estabelecido a longo prazo. | Cinza de cal como nova matéria-prima pode se adequar bem aos agentes e procedimentos setoriais existentes. | Falta de experiência e desempenho de longo prazo pode ser um obstáculo para a adoção dos novos produtos pré-fabricados |
| | Trabalhadores são usados para lidar cinza de cal, mas como um resíduo. Enquanto, a cinza de cal deve ser tratada como um potencial SRM e estar ciente do seu valor. | Transporte de resíduos só pode ser realizado pelo produtor ou proprietário dos resíduos ou por um operador de gestão de resíduos. Isso pode impedir seu uso. | Falta de experiência e desempenho de longo prazo pode ser um obstáculo para a adoção dos novos produtos pré-fabricados. | Desafios organizacionais e tecnológicos são alcançáveis. |
| | Gestão das cinzas de cal envolve um armazenamento cuidadoso, de modo a manter a cinza de cal seca. | | Desafios organizacionais e tecnológicos são alcançáveis. | |
| Financeira | Deposição da cinza de cal em aterro é barata (24€/t por resíduo). Deste modo, os custos podem não ser suficientemente caros para desencadear inovação e novas CEM. | Cinza de cal deve ser armazenada e transportada no estado seco. O transporte deve ser feito num camião-cisterna pelo operador de gestão de resíduos e, conseqüentemente os custos aumentam. | Não há necessidade de alterar de forma substancial o método de elaboração do betão pré-fabricado. Deste modo, não são necessários custos de investimento extras, exceto as infraestruturas de armazenamento adicionais (condições secas) e transporte mais caro. | Custos extras de transporte e armazenamento e sua atribuição (quem os paga?). |
| | Qualidade da cinza de cal deve ser garantida de forma contínua, bem como, o seu armazenamento e transporte. Conseqüentemente aumenta os custos. | Betões tradicionais continuam a ser muito competitivos. | VRM (<i>Virgin Raw Materials</i>) são muito competitivos (baratos) hoje em dia em muitos países europeus, como em Portugal. | Sem incentivos financeiros. As vantagens financeiras baseadas no conceito de “rótulo verde”, quando existem, não são suficientes para competir com os produtos de referência. |

Tabela 89. (Continuação) Barreiras na utilização da cinza de cal no betão pré-fabricado.

| Barreira/ facilitador | Produtor do resíduo | Operador de gestão do resíduo | Utilizador final (produtor de betão pré-fabricado) | Avaliação |
|-----------------------|--|---|---|---|
| Financeira | Disponibilidade da cinza de cal (um único produtor), barreiras geográficas e limitação da rentabilidade com base nas distâncias de transporte. | Falta de incentivos financeiros para a valorização de resíduos. | Os materiais tradicionais são mais baratos e os novos materiais que incorporem SRMs têm baixa utilização. Os preços baixos e os custos de tratamento podem ser um risco para viabilidade económica dos novos produtos, a menos que existam vantagens ou o desempenho claro. | Deposição em aterro ainda é barata. |
| | | Proibição deposição em aterro, no futuro, ou aumento dos impostos para o nível médio dos impostos da EU, pode conduzir a uma grande utilização da cinza de cal em betões. | Falta de incentivos financeiros. Falta de rótulo ambiental para materiais de construção acompanhados de subsídios por serem “verdes”. | Introdução técnica de cinzas de cal é completamente viável. Não há necessidade de investimentos extras em equipamentos ou novas competências. |
| | | | Grandes investimentos em demos são necessários. Sólidos acordos comerciais. | |
| Social/cultural | Resistências internas para adoção do novo modelo CE não devem ser motivo de preocupação para este caso de estudo. | Resistências internas para adoção de novo CEM não são relevantes neste caso. | Resistências internas para adoção do novo modelo de economia circular (CE) não devem ser motivo de preocupação. A elaboração do novo betão com a cinza de cal não requer mudanças críticas no processo. | Nenhuma resistência social relevante para a adoção do novo modelo CE não deve ser motivo de preocupação para este caso de estudo. Não existem grandes mudanças no processo. |
| | | Falta de coordenação entre os diferentes poderes públicos em todas as atividades de valorização e implementação de novas políticas. | Clientes podem perceber a cinza de cal como um risco e desconfiança, devido à sua origem como um resíduo. Divulgação pode ser uma estratégia para ultrapassar esta barreira. | Divulgação pode ser uma estratégia para ultrapassar a desconfiança na valorização de resíduos. |

Os resultados da análise da visão de mercado (*market insight*) dos potenciais clientes resultaram de duas entrevistas (de acordo com o guião da Tabela 86) e de treze respostas do questionário online (Tabela 84), de modo a analisar o interesse dos potenciais clientes em aplicar produtos de construção com resíduo incorporado em vez dos produtos com materiais naturais. Ao nível das entrevistas, as características das empresas eram:

- Empresa 1: tem unidades de produção de betão pronto e betão pré-fabricado, no norte de Espanha. Onde várias unidades da produção de pasta e papel estão num raio de 150km.
- Empresa 2 opera no setor da construção civil, tais como, edifícios, pontes, pavilhões, muros, etc. A empresa opera principalmente na zona do País Basco mas, também, em algumas zonas do norte de Espanha. Além disso, empregam produtos pré-fabricados de betão e usam grandes volumes de betão pronto, nas suas construções.

Os entrevistados demonstraram interesse no uso de cinzas de cal, como matéria-prima alternativa na produção de betão. No entanto, existem alguns entraves identificados, pelas empresas entrevistadas, que podem condicionar o uso da cinza de cal, nomeadamente:

- A proximidade e o custo de aquisição, por exemplo o preço das escórias EAF é três vezes menor do preço da matéria-prima tradicional.
- A disponibilidade, o preço competitivo, e a experiência e conhecimento na aplicação de filler calcário.

Assim, a escolha das novas soluções face às soluções atuais está condicionada pelo preço, disponibilidade no fornecimento (distância e camiões) e pelas especificações técnicas (tamanho de partícula, armazenamento e homogeneidade do produto, desempenho técnico e ambiental do produto).

Avaliando o processo de abastecimento, os entrevistados mostram-se sensíveis em revelar dados sobre dados sobre as frequências, volumes, embalagens e preços. Por outro lado, os gestores de projeto ou gestores da logística são responsáveis por identificar as melhores soluções de acordo com as informações de aquisição previamente identificadas, nomeadamente disponibilidade, preço e tempo de fornecimento.

Do ponto de vista do conhecimento sobre a economia circular, a primeira empresa afirmou que está totalmente comprometida com a seleção de seus fornecedores com base no seu processo de reciclagem. Em particular, esta empresa mencionou que já há algum tempo começou a procurar agregados alternativos. A nível regional, o preço dos agregados naturais

(calcários) aumentou drasticamente (+ 100%) durante algum tempo. Deste modo, a empresa corria o risco de tornar seu negócio insustentável, por isso decidiram avaliar a possibilidade de empregar escórias de alto forno (EAF) estando a trabalhar intensamente com as escórias. Após essa experiência, a empresa decidiu explorar e testar novas alternativas de matérias-primas alternativas, como resíduos de C&D, escórias de caldeiras de leito fluidizado (LF), escórias de incineração de resíduos urbanos (WPFA), areias industriais, entre outros resíduos. Entretanto, a segunda empresa afirma não ser especialista no emprego de recursos alternativos, mas atualmente está a aplicar solos e rochas escavados, resíduos de C&D e escórias de EAF em vários trechos.

Por fim, os entrevistados foram questionados sobre a viabilidade de adquirir um material reciclado com as mesmas características técnicas a um preço superior e, ambos também afirmam que o compromisso da empresa com o meio ambiente é importante, mas que o preço desses materiais não pode ser mais alto do que os materiais tradicionais.

Passando à análise do mercado (*market overview*), o desempenho técnico foi o requisito identificado nas entrevistas para ser impulsionador na adoção do cinza de cal como filler no mercado do betão pré-fabricado. Quando a demonstração do desempenho técnico da solução circular é inferior ao desempenho técnico da solução linear, a indústria perde o interesse em incorporar a matéria-prima alternativa no seu processo produtivo. Os resultados obtidos com a cinza de cal como filler (Figura 48, Figura 54, Figura 57 e Figura 58) mostraram um comportamento idêntico à matéria-prima tradicional (filler natural) sem provocar alterações ao processamento e, por isso, a indústria do betão pré-fabricado mostrou um elevado interesse na incorporação da cinza de cal no seu produto final como um agregado alternativo.

Depois da viabilidade técnica, o preço das matérias-primas é um fator chave na aplicação da cinza de cal pela indústria do betão pré-fabricado. Esta indústria usa frequentemente o filler calcário natural e o seu custo de aquisição é baixo devido à abundância deste recurso em Portugal e noutros países europeus. Deste modo, o custo final do filler alternativo (resíduo) é condicionado pela distância de transporte entre o produtor do filler e do betão. Por isso, a cinza de cal deve ser competitiva relativamente à matéria-prima tradicional (filler natural). Assim, a competitividade deste modelo de negócio é garantida pela oferta gratuita do resíduo à indústria do betão, abatendo no custo da deposição em aterro da cinza de cal e, além disso, escolher uma distância de transporte entre o gerador do resíduo e o produtor do betão reduzida, que no caso piloto foi conseguida (23km) para diminuir os custos. No caso

do modelo linear neste caso piloto, o produtor de betão e o fornecedor do filler natural estavam afastados de 82km.

Outro aspeto que está implementado no mercado é a regulamentação do sector público, ou seja, os produtores de betão devem garantir que os seus produtos sejam certificados como materiais de construção, de modo a possuir a marcação CE. Esta certificação mostra que os produtos cumprem com os requisitos europeus de segurança, bem como, os requisitos europeus de desempenho técnico e ambiental.

Por fim, a implementação da cinza de cal como filler para indústria do betão está condicionada pela capacidade de fornecimento, isto é, foi apontado como relevante a existência de material suficiente para se manter um fornecimento contínuo, de modo a evitar a escassez do material e a volatilidade do preço.

Por último, para a replicação do modelo de negócio, e a adoção deste caso de estudo por outros intervenientes pré-fabricado industriais, foi realizada uma análise SWOT para se identificar os forças, oportunidades, fraquezas e ameaças, que está exposta na Tabela 88.

Na unidade de produção (PPI) estudada, o gerador da cinza de cal produz 2240 t de resíduo por ano, enquanto que o produtor de betão pré-fabricado participante da experiência consumiu aproximadamente 604 t de filler natural em 2020. Deste modo, o abastecimento contínuo da cinza de cal seria garantido à unidade de produção do betão pré-fabricado e a distância de transporte do filler seria reduzida dos 83 km para 23 km. No entanto, este consumo está condicionado pela obtenção da autorização legal para desclassificação do resíduo como subproduto, pelo que a emissão da licença pode garantir o sucesso da replicabilidade.

Por outro lado, o fator que influencia o custo do filler do mercado do betão pré-fabricado é o seu transporte, devido às grandes quantidades de material que devem ser transportados pelo camião até ao local de produção.

No modelo linear, esta indústria compra o filler a 82 km da sua unidade e gasta 0,32€/km/t (incluindo o filler mais o seu transporte). Passando para o modelo circular, o produtor de betão pagaria apenas o transporte e gastaria apenas 0,15€/km/t. Ao mesmo tempo, a indústria do pasta e papel pouparia 35€ por t relativos ao custo de deposição do resíduo em aterro (modelo linear). Se, neste momento, o produtor de betão está a aceitar o filler natural a esse custo, viajando cerca de 82 km, então para a mesma quantidade de cinza

de cal que um filler poderia percorrer o dobro da distância (164 km). Por conseguinte, este seria o raio de distância máximo para o fornecimento a outras unidades de produção de betão.

Em síntese, os casos de estudo apresentam um conjunto de barreiras que podem condicionar o sucesso dos novos modelos de negócio de economia circular. Deste modo, os resíduos necessitam de obter uma licença de desclassificação do resíduo para garantir a sua comercialização pelo mercado. No caso de estudo do pavimento rodoviário, as várias barreiras (resíduo, processo, setorial, financeira e social e cultural) estão relacionadas com o pré-tratamento da secagem dos resíduos.

Relativamente à análise global de mercado (*market insight*), os dois modelos estão condicionados pela definição do preço e da distância no fornecimento, face à solução atual, ou seja, a cadeia de abastecimento da solução tradicional é uma barreira à implementação das novas soluções. Por outro lado, o mercado está familiarizado com o conceito de economia circular mas, excetuando alguns casos pontuais, ainda não aceita que o preço ultrapasse o preço das soluções tradicionais. Deste modo, o modelo de negócio do pavimento rodoviário e do betão pré-fabricado pode ser replicado até 65 e 164 km, respetivamente.

Capítulo 8

Considerações finais

8. Considerações finais

8.1. Conclusões

Atualmente, o setor da construção e a indústria de pasta e papel têm os seus modelos de produção baseados na economia linear, ou seja, extração e utilização de recursos naturais seguido de deposição dos resíduos em aterro, respetivamente. Em suma, este modelo segue uma lógica de “extração-uso-deposição” e, ao mesmo tempo, não promove o equilíbrio desejável das dimensões económica, social e ambiental da sustentabilidade.

Uma das formas para promover a sustentabilidade pode ser através da simbiose intersectorial como neste caso dos sectores da construção e de pasta e papel, apostando na adoção de modelos de negócios de economia circular, onde os resíduos de um setor são usados como matéria-prima alternativa pelo outro setor. Assim, ao longo deste trabalho procurou-se dar resposta aos quatro objetivos específicos definidos, de modo a validar a viabilidade técnica e financeira, num contexto industrial, da incorporação de resíduos da indústria de pasta e papel no betão pré-fabricado e nas misturas betuminosas, de acordo com um modelo de economia circular. Respondendo assim, em jeito de conclusão, às questões que os quatro objetivos específicos colocam pode-se sintetizar as respostas nos seguintes termos:

1. É tecnicamente possível a incorporação de resíduos industriais do setor da pasta e papel como matérias primas alternativas em materiais de construção como o betão pré-fabricado ou em misturas betuminosas para a camada de desgaste superficial de uma estrada sem degradar as suas características fundamentais?

Foi possível demonstrar ao nível laboratorial e à escala real a exequibilidade técnica através da análise das características fundamentais e do desempenho dos materiais de construção com resíduos. Estes resíduos foram usados como uma matéria-prima alternativa aos agregados naturais usados na produção das misturas betuminosas e do betão pré-fabricado, os dois casos de estudo piloto. No primeiro caso, os resíduos, *dregs* e *grits*, substituíram parcialmente (4%) o pó de calcário da mistura betuminosa (AC 14 *surface*) de desgaste do pavimento rodoviário. Estes foram caracterizados e produzidos de acordo com os requisitos dos materiais tradicionais (sem resíduo) e obtiveram um desempenho idêntico à solução tradicional (mistura sem resíduo), ou seja, cumpriram com os requisitos exigidos

pelas normas, enquanto a monitorização dos lixiviados demonstrou que as soluções também não comprometiam o meio ambiente.

Passando ao segundo caso de estudo, ou seja, a utilização da cinza de cal como matéria-prima alternativa na produção de betão pré-fabricado de elementos lineares (asnas e pilares), à escala industrial. O resíduo substituiu totalmente o fíler natural (2,4 e 4,4% da composição da asna e do pilar, respetivamente) e a incorporação não afetou o desempenho técnico da solução desenvolvida. Além disso, a passagem à escala industrial desta solução circular também não alterou o tempo de produção e as etapas de produção requeridas na composição do betão de referência.

2. São necessários tratamentos preliminares aos resíduos para tal aplicação? Que parâmetros devem ser controlados em ambos os casos numa escala real de aplicação e validação da solução circular?

Passando aos tratamentos eventualmente necessários, os *dregs* e os *grits* exigiram um pré-tratamento (secagem e peneiração), de modo a eliminar o constrangimento da humidade (50% e 16% para *dregs* e *grits*, respetivamente) para as misturas betuminosas. Este pré-tratamento foi necessário para se reduzir a humidade inicial e garantir a sua utilização na central de mistura betuminosa. Deste modo, a secagem foi realizada num operador de gestão de resíduos que possuía um túnel solar para secar os resíduos e garantia o transporte licenciado de modo a cumprir com a legislação em vigor sobre resíduos. Após o pré-tratamento dos resíduos, a produção e aplicação da mistura betuminosa usou os mesmos equipamentos e mão-de-obra da solução tradicional (mistura betuminosa sem resíduo).

No caso do betão pré-fabricado, o uso de cinzas de cal como filler alternativo não exigiu nenhum pré-tratamento do resíduo antes da incorporação no betão. Nos dois casos, os parâmetros sobre os quais foi necessário manter o controlo foram os relativos aos processos e tempos de produção bem como as características técnicas das matérias primas (incluindo os resíduos) para garantir o bom desempenho das formulações nos processos de manufatura e aplicação e também garantir no final o bom desempenho dos produtos resultantes, satisfazendo os requisitos impostos pelas normas em vigor.

3. Como utilizar a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) para apreciar o grau de sustentabilidade ambiental, económico e social destas duas soluções circulares face

ao estado de referência atual dos modelos respetivos de produção linear corrente? Quais os impactos gerados pela solução “circular” face à referência atual do respetivo caso “linear”?

Apesar da incorporação dos resíduos nos materiais de construção ser baixa, esta gera reduções na dimensão social, económica e ambiental, de acordo com a avaliação de ciclo de vida realizada aos modelos circular e linear de produção dos materiais de construção relativos aos dois casos de estudo. No caso da dimensão ambiental, os impactos das misturas betuminosas com resíduos foram reduzidos entre 0,1 e 2% para as várias categorias de impactos ambientais, nomeadamente o aquecimento global (GWP 100), a acidificação (AP), a formação de oxidantes fotoquímicos (POFP), a depleção de ozono estratosférico (ODP), a depleção dos recursos abióticos não fósseis (ADP-elementos) e fósseis (ADP combustíveis fósseis), a demanda de energia acumulada (CED) e o uso da água (WU). Também os impactos do betão para os pilares e para as asnas foram reduzidos entre 1 e 3% e 0,2 e 1,4%, respetivamente. Estas reduções de impactos são geradas pela substituição da matéria-prima tradicional (filler natural e pó de calcário) pelos resíduos e pela eliminação da deposição dos resíduos em aterro, contudo os impactos da solução linear e circular advém principalmente da utilização do betume e do cimento na mistura betuminosa e no betão pré-fabricado, respetivamente. Os baixos valores de redução são consequência do baixo nível de teor de incorporação dos resíduos utilizados neste trabalho, mas a sua tendência de redução de impactos pode ser incrementada ainda mais por uma substituição mais alargada dos outros componentes da formulação por outros resíduos.

No caso da dimensão económica, as soluções circulares da mistura betuminosa com *dregs* e com *grits*, do betão dos pilares e das asnas geram uma poupança entre 3 e 6%, respetivamente, face às operações do modelo linear, onde em vez de valorizar o resíduo se envia para deposição em aterro. Esta poupança é assegurada pelo custo nulo dos resíduos e pela poupança nos agregados naturais por parte do fabricante final. Por fim, no caso da dimensão social, as soluções circulares também apresentam uma redução de impactos nas categorias dos consumidores, das comunidades locais, da sociedade, dos atores da cadeia de valor e dos trabalhadores, face à solução linear dos casos de estudo.

4. *Relativamente ao modelo de negócio de suporte a estas alterações induzidas nos dois casos de estudo, quais são os elementos críticos, as barreiras ou condicionantes para uma aplicação com sucesso do modelo circular?*

Por fim, a definição do último objetivo, permitiu identificar as várias barreiras tecnológicas e não tecnológicas (social, cultural, regulatória, sectorial e financeira), que podem condicionar a implementação dos casos de estudo. Antes da comercialização pelo mercado, os resíduos necessitam de obter uma licença de desclassificação do resíduo. A etapa de pré-tratamento dos *dregs* e dos *grits* deve ser controlada, de modo a evitar custos adicionais que podem inviabilizar a operação. No caso das cinzas de cal, como não exigem pré-tratamento, este risco é minimizado.

Relativamente à análise global de mercado (*market insight*), os dois modelos estão condicionados pela definição do preço e da distância no fornecimento, face à solução atual, ou seja, a cadeia de abastecimento da solução tradicional está enraizada no mercado e pode condicionar a implementação das novas soluções. Assim, a replicabilidade do modelo de negócio é assegurada até uma distância de 65 e 164 km para o modelo das misturas betuminosas e do betão pré-fabricado, respetivamente. Relativamente à definição do preço, embora o mercado esteja já familiarizado com o conceito de economia circular, o preço das soluções alternativas não deve ultrapassar significativamente o preço das soluções tradicionais.

8.2. Trabalhos futuros

O presente trabalho permitiu avaliar no contexto da economia circular de materiais de construção (misturas betuminosas e betão pré-fabricado) a viabilidade do uso de resíduos da indústria da Pasta e Papel como matérias primas alternativas às naturais. Tendo em atenção aos resultados obtidos e à análise da sustentabilidade das soluções e dos constrangimentos dos modelos de negócio circulares associados aos dois casos piloto, proporia para desenvolvimentos futuros deste trabalho que se deve aprofundar determinadas questões, nomeadamente:

- Avaliar a replicabilidade dos casos de estudo noutras unidades produtivas de pasta e papel em Portugal e noutros setores da construção (argamassas, revestimentos e outros);

- Procurar novos resíduos compatíveis com as matérias-primas tradicionais, de modo a reduzir os impactos nas várias dimensões da sustentabilidade, substituindo os outros componentes das formulações estudadas de forma mais alargada para se gerar uma redução mais significativa nos impactes ambientais, económicos e sociais no setor da construção.
- Aprofundar o impacto da introdução destes e outros resíduos como matérias primas alternativas em outras propriedades importantes para o desempenho dos materiais estudados como, por exemplo, a resposta ao ataque por cloretos e sulfatos (durabilidade do betão), ou ainda, no estudo das deformações permanentes e da fadiga das misturas betuminosas como complemento ao trabalho já efetuado.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

- Ahmadi, B., Al-Khaja, W., 2001. Utilization of paper waste sludge in the building construction industry. *Resour. Conserv. Recycl.* 32, 105–113. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00051-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00051-9)
- Almeida, M., 2018. ANIET - Relatório de Avaliação do Ciclo de Vida. Coimbra.
- An, V., Maarten, C., Veronique, V.H., 2018. 1. Indicators for a Circular Economy -. Flandres.
- Andrews, E.S., Barthel, L.-P., Beck, T., Benoît, C., Citroth, A., Cucuzzella, C., Gensch, C.-O., Hébert, J., Lesage, P., Manhart, A., Mazeau, P., 2009. Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. UNEP/SETAC.
- APA, 2021. Legislação: Avaliação e Gestão Ambiental - Licenciamento Único Ambiental - Legislação. <https://apambiente.pt/avaliacao-e-gestao-ambiental/legislacao-3> (acedido 2.18.22).
- APA, 2019a. Subprodutos: Resíduos - Produção e gestão de resíduos - Desclassificação de resíduos – Subprodutos. <https://apambiente.pt/residuos/subprodutos> (acedido 5.3.19).
- APA, 2019b. Fluxos Específicos de Resíduos: Resíduos - Fluxos específicos de resíduos. <https://apambiente.pt/residuos/fluxos-especificos-de-residuos> (acedido 9.13.19).
- APA, 2019c. Fim do Estatuto de Resíduo: Resíduos: Produção e gestão de resíduos - Desclassificação de Resíduos - Fim do estatuto de Resíduo. <https://apambiente.pt/residuos/fim-do-estatuto-de-residuo> (acedido 9.13.19).
- APA, 2017a. Guia de Classificação de Resíduos. Lisboa.
- APA, 2017b. Mecanismos de Desclassificação de Resíduos. Lisboa.
- APEB, 2020. Betão n. 43 - Julho 2020. Assoc. Port. das Empres. Betão Pronto 38–40.
- APORBET, 1998. Misturas Betuminosas Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Lisboa.
- Azevedo, A.R.G., Marvila, T.M., Júnior Fernandes, W., Alexandre, J., Xavier, G.C., Zanelato, E.B., Cerqueira, N.A., Pedroti, L.G., Mendes, B.C., 2019. Assessing the potential of sludge generated by the pulp and paper industry in assembling locking blocks. *J. Build. Eng.* 23, 334–340. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.012>
- Barbosa, R., Lapa, N., Dias, D., Mendes, B., 2013. Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances. *Constr. Build. Mater.* 48, 457–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031>

- Barreiros, M.S., 2014. A Indústria de Pasta e Papel Um caso de estudo da Economia Circular. Lipor, Gondomar.
- Bastos, D.R. da S., 2014. Avaliação de casos de valorização de resíduos de celulose em materiais de construção (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro.
- BCSD, 2017. Economia Circular BCSD Portugal, Business Council for Sustainable Development (BCSD) Portugal. Lisboa.
- BEES, 2011. Generic Asphalt with Traditional Maintenance.
- Benachio, G.L.F., Freitas, M. do C.D., Tavares, S.F., 2020. Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Benta, A., Santos, L.P., Macedo, J., 2008. Reabilitação de um Pavimento Flexível: observação do estado superficial, avaliação da capacidade estrutural e soluções de reforço, em: 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo.
- Bocken, N.M.P., de Pauw, I., Bakker, C., van der Grinten, B., 2016. Product design and business model strategies for a circular economy. *J. Ind. Prod. Eng.* 33, 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Branco, F., Picado Santos, L., Pereira, P., 2016. Pavimentos Rodoviários. Edições Almedina, Coimbra.
- BSI, 2017a. BS 8001:2017: Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations : guide. British Standards Institution, Londres.
- BSI, 2017b. Executive Briefing: BS 8001-a Guide. Londres.
- Buruberri, L.H., 2014. Uso de lamas e cinzas da indústria da celulose em clínquer (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade de Aveiro: Departamento de Materiais e Cerâmica do Vidro.
- Buruberri, L.H., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2015. Preparation of clinker from paper pulp industry wastes. *J. Hazard. Mater.* 286, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.12.053>
- Calbrita, 2021. Declaração de Desempenho N.º01/ Pó (0/4) IBC1. Calbrita, Alenquer.
- Cao, R., Leng, Z., Hsu, S.-C., 2019. Comparative eco-efficiency analysis on asphalt pavement rehabilitation alternatives: Hot in-place recycling and milling-and-filling. *J. Clean. Prod.* 210, 1385–1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.122>
- Castro, F., Vilarinho, C., Trancoso, D., Ferreira, P., Nunes, F., Miragaia, A., 2009. Utilisation of pulp

- and paper industry wastes as raw materials in cement clinker production. *Int. J. Mater. Eng. Innov.* 1, 74. <https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2009.024028>
- Cavaleiro de Ferreira, A., Fuso-Nerini, F., 2019. A Framework for Implementing and Tracking Circular Economy in Cities: The Case of Porto. *Sustainability* 11, 1813. <https://doi.org/10.3390/su11061813>
- CE, 2020a. EU Circular Economy Action Plan A new Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe. Comissão Eur. <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/> (acedido 4.13.20).
- CE, 2020b. Pacto Ecológico Europeu. Comissão Eur. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt (acedido 4.13.20).
- CE, 2019a. Eco-Innovation at the heart of European Policies: Circular Economy Indicators [WWW Document]. Comissão Eur. URL https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/circular-economy-indicators_en (acedido 8.1.19).
- CE, 2019b. Eco-Innovation at the heart of European policies: Sustainable Resource management. Comissão Eur. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/sustainable-resource-management_en (acedido 8.2.19).
- CE, 2019c. Eco-Innovation at the heart of European policies: Societal behaviours. Comissão Eur. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/societal-behaviours_en (acedido 8.2.19).
- CE, 2019d. Eco-Innovation at the heart of European policies: Business operations. Comissão Eur. URL https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/business-operations_en (acedido 8.2.19).
- CE, 2019e. Relatório da Comissão ao Parlamento europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões sobre a aplicação do Plano de Ação para a Economia Circular. Bruxelas.
- CE, 2018a. Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das regiões sobre um quadro de controlo da economia circular. Estrasburgo.
- CE, 2018b. Diretiva (UE) 2018/851 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de maio de 2018, que altera a Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos. J. Of. da União Eur.
- CE, 2014a. Decisao 2014/955/UE - Lista Europeia de resíduos (LER).
- CE, 2014b. Eco inovação: o segredo da competitividade futura da Europa?). <https://doi.org/10.2779/31393>

- CE, 2008. Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Novembro de 2008 , relativa aos resíduos e que revoga certas directivas.
- Celbi, 2018. Declaração Ambiental 2018. Figueira da Foz.
- CELPA, 2018. Boletim estatístico indústria Papeleira Portuguesa 2018. Lisboa.
- CELPA, 2017. Boletim estatístico - Indústria Papeleira Portuguesa 2017. Lisboa.
- Cepriá, J.J., Guedella, E., Maurice, C., Westin, G., 2017. Paperchain Project : Establishing a New Circular Eco- nomy Model between the Mining Sector and the Pulp & Paper Industry to Prevent Acid Mine Drainage, em: Christian Wolkersdorfer, Lotta Sartz, Mika Sillanpää, A.H. (Ed.), 13th International Mine Water Association Congress – Mine Water & Circular Economy. Lappeenranta, Finland, pp. 892–899.
- Cernec, F., Zule, J., Moze, A., Ivanuš, A., 2005. Chemical and microbiological stability of waste sludge from paper industry intended for brick production. *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.* 23, 106–112. <https://doi.org/10.1177/0734242X05053662>
- Chowdhury, A., Islam, K.M., Rahaman M. Z., Sobhan, M.A., 2013. Integrated Approach to Investigation of Effect of Salt on Bitumen Properties and Stability of Flexible Pavement in Coastal Areas. *Glob. J. Res. Eng.* 13.
- Chowdhury, R., Apul, D., Fry, T., 2010. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. *Resour. Conserv. Recycl.* 54, 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007>
- Ciroth, A., Finkbeiner, M., Hildenbrand, J., Klöpffer, W., Mazijn, B., Prakash, S., Sonnemann, Traverso, M., Ugaya, C.M.L., Valdivia, S., Vickery-Niederman, G., 2011. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products. UNEP/SETAC, Paris.
- Colangelo, F., Forcina, A., Farina, I., Petrillo, A., 2018. Life Cycle Assessment (LCA) of Different Kinds of Concrete Containing Waste for Sustainable Construction. *Buildings* 8, 70. <https://doi.org/10.3390/buildings8050070>
- Correia, A.A.C., Roque, A., Oliveira, P.J.V.O., Biscaia, P., Lopes, M. de L., Figueiredo, F.P., Pedro, A., 2017. Economia Circular em Geotecnia Ambiental Apresentações eBook, Workshop Economia Circular em Geotecnia Ambiental. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Coimbra.
- Correia, A.G., Martins, J.P., Roque, A.J., Caldeira, L., Fortunato, E., 2007. Casos de obra: Trecho Experimental na EN 111 Fafe – Várzea Cóvoa. Seminário sobre Valorização de Resíduos em Infraestruturas de Transportes e Obras Geotécnicas : Aplicação a Agregados Siderúrgicos Inertes para a Construção (ASIC), Lisboa.

- Costa, C., Marques, J., 2018. Feasibility of Eco-Friendly Binary and Ternary Blended Binders Made of Fly-Ash and Oil-Refinery Spent Catalyst in Ready-Mixed Concrete Production. *Sustainability* 10, 3136. <https://doi.org/10.3390/su10093136>
- Costa, I., Massard, G., Agarwal, A., 2010. Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. *J. Clean. Prod.* 18, 815–822. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.12.019>
- COTEC, 2016a. Quem São os Pioneiros da Economia do Zero Desperdício? <http://www.cotecportugal.pt/pt/noticias-e-eventos/quem-sao-os-pioneiros-da-economia-do-zero-desperdicio> (acedido 7.14.19).
- COTEC, 2016b. Economia Circular Preservar, otimizar e assegurar recursos essenciais para o nosso futuro. COTEC Portugal, Lisboa.
- CTCV, 2006. Estudo de Mercado e Inovação sobre Materiais para a Construção Sustentável. Coimbra.
- Cunha, T.M.A., 2020. Utilização de resíduos em betões e argamassas. (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro.
- Cusidó, J.A., Cremades, L.V., Soriano, C., Devant, M., 2015. Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. *Appl. Clay Sci.* 108, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.027>
- da Costa, T.P., Quinteiro, P., Tarelho, L.A.C., Arroja, L., Dias, A.C., 2019. Environmental assessment of valorisation alternatives for woody biomass ash in construction materials. *Resour. Conserv. Recycl.* 148, 67–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.022>
- de Azevedo, A.R.G., Alexandre, J., Xavier, G. de C., Pedroti, L.G., 2018. Recycling paper industry effluent sludge for use in mortars: A sustainability perspective. *J. Clean. Prod.* 192, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.011>
- Deviatkin, I., Kapustina, V., Vasilieva, E., Isyanov, L., Horttanainen, M., 2016. Comparative life cycle assessment of deinking sludge utilization alternatives. *J. Clean. Prod.* 112, 3232–3243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.022>
- Dias, V.D.M., 2012. Aplicação de resíduos sólidos em pavimentos rodoviários (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro:Departamento de Engenharia Civil.
- Donmez Cavdar, A., Yel, H., Boran, S., Pesman, E., 2017. Cement type composite panels manufactured using paper mill sludge as filler. *Constr. Build. Mater.* 142, 410–416. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.099>

- DRE, 2017. Resolução do Conselho de Ministros 190-A/2017 de 11 de dezembro. Diário da República, Portugal.
- DRE, 2015. Decreto-Lei n.º 73/2015 de 27 de julho. Diário da República, Portugal.
- DRE, 2011. Decreto-Lei n.º 73/2011 de 17 de junho. Diário da República, Portugal.
- DRE, 2009. Decreto-Lei n.º 183/2009 de 10 de agosto. Diário da República, Portugal.
- DRE, 2006. Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de setembro. Diário da República, Portugal.
- EAPA, 2020. The use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures (Position Paper). Bruxelas.
- EAPA, 2019. Asphalt in figures 2019. Brussels.
- eco.nomia, 2019. Economia Circular - O que é a Economia Circular? <http://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/estrategias> (acedido 7.29.19).
- Eco.nomia, 2020. Economia Circular – Políticas. República Port. <https://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/principios> (acedido 4.13.20).
- Eco.nomia, 2019. Economia Circular - Estratégias da Economia Circular. <https://eco.nomia.pt/pt/economia-circular/diagrama-de-sistemas> (acedido 7.30.19).
- Elia, V., Gnoni, M.G., Tornese, F., 2017. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. J. Clean. Prod. 142, 2741–2751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.196>
- Ellen MacArthur Foundation, 2013. 1 - Towards the circular economy - Economic and business rationale for an accelerated transition. Cowes.
- Ellen MacArthur Foundation, 2017. Economia Circular: 3 Escolas de pensamento [WWW Document]. URL <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular-1/escolas-de-pensamento> (acedido 7.14.19).
- Ellen MacArthur Foundation, Granta design, Life, 2015. Circularity indicators: an approach to measuring circularity (methodology). Cowes.
- EP, 2014. Caderno de Encargos Tipo Obra: 14.03 - Pavimentação: Características dos materiais. Estradas de Portugal, S.A, Lisboa.
- EPA, 2000. Hot mix asphalt plants emission assessment report. United States.
- ERMCO, 2019. Ready-mixed concrete industry statistics - year 2018. Brussels.
- Estanqueiro, B., Dinis Silvestre, J., de Brito, J., Duarte Pinheiro, M., 2018. Environmental life cycle

- assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 22, 429–449. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197161>
- Eurobitume, 2019. The Eurobitume Life-Cycle Inventory For Bitumen (version 3.0) - Oil Extraction - Refining- Storage - Transport. Brussels.
- Eurocálcio, 2021. Eurocálcio calcários e inertes – produtos. <https://www.eurocalcio.pt/produtos/> (acedido 3.15.22).
- European Commission, 2016. The efficient functioning of waste markets in the European Union : legislative and policy options : final report. Luxembourg. <https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2779/810929>
- EY-AM&A, 3Drivers, 2018. Estudo sobre a Relevância e o Impacto do Setor dos Resíduos em Portugal na Perspetiva de uma Economia Circular (Relatório Final). Lisboa.
- FAO, 2018. pulp and paper capacities - survey (2017-2022). Roma.
- Farage, R.M.P., Silva, C.M., Passos Rezende, A.A., Lelis Leal de Souza, J.J., Teixeira de Matos, A., Vinha Zanuncio, A.J., 2019. Intermediate covering of municipal solid waste landfills with alkaline grits, dregs and lime mud by-products of kraft pulp production. *J. Clean. Prod.* 239, 117985. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117985>
- Farcimar, 2017. FARCIMAR - Marcação CE. <http://www.farcimar.pt/pt/empresa/marcacao-ce/> (acedido 3.15.22).
- Ferrão, P., 2009. *Ecologia Industrial : Princípios e Ferramentas*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Ferrão, P., Pinheiro, L., Ribeiro, P., Niza, S., Santos, C., Vilão, R., Carrola, C., Gonçalves, L., Vaz, A., Feliciano, M., Machado, M., Simão, P., Dias, B., 2011. PNGR - Plano Nacional de Gestão de Resíduos 2011-2020. Lisboa.
- Ferreira, I., de Castro Fraga, M., Godina, R., Souto Barreiros, M., Carvalho, H., 2019. A Proposed Index of the Implementation and Maturity of Circular Economy Practices—The Case of the Pulp and Paper Industries of Portugal and Spain. *Sustainability* 11, 1722. <https://doi.org/10.3390/su11061722>
- Ferreira, V., Paiva, H., Simoes, F., 2020. paperChain D05.2 - Implementation of Circular Case 1. Asphalt and concrete applications. Aveiro. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5275469>
- Ferreira, V.J., Sáez-De-Guinoa Vilaplana, A., García-Armingol, T., Aranda-Usón, A., Lausín-González, C., López-Sabirón, A.M., Ferreira, G., 2016. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact

- assessment. *J. Clean. Prod.* 130, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.094>
- Fonseca, L.M., Domingues, J.P., Pereira, M.T., Martins, F.F., Zimon, D., 2018. Assessment of circular economy within Portuguese organizations. *Sustain.* 10, 1–24. <https://doi.org/10.3390/su10072521>
- Fraga, M.A.C.H.C., 2017. A economia circular na indústria portuguesa de pasta, papel e cartão (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Freire, A.C., Antunes, M.L., Coutinho, A.S., Sousa, C.D., Barata, J.M., 2012. Aplicação de escórias de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) na construção rodoviária., em: LNEC (Ed.), *Jornadas LNEC - Cidades e Desenvolvimento*. Lisboa.
- Freire, A.C., Neves, J., Roque, A.J., Martins, I.M., Antunes, M.L., Rua Faria, G., 2013. SUPREMA – Aplicação sustentável de resíduos de construção e demolição (RCD) em infraestruturas rodoviárias - Relatório de progresso do projeto PTDC/ECM/100931/2008 – Ano 3. Lisboa.
- Frías, M., Rodríguez, O., Sánchez de Rojas, M.I., 2015. Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Constr. Build. Mater.* 74, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.007>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N.M.P., Hultink, E.J., 2017. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.* 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S., 2016. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.* 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Goel, G., Kalamdhad, A.S., 2017. An investigation on use of paper mill sludge in brick manufacturing. *Constr. Build. Mater.* 148, 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.087>
- Gopal, P.M., Sivaram, N.M., Barik, D., 2019. Paper Industry Wastes and Energy Generation From Wastes, em: Debabrata Barik (Ed.), *Energy from Toxic Organic Waste for Heat and Power Generation*. Elsevier, pp. 83–97. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102528-4.00007-9>
- Harsco, 2013. o ASIC – apresentação. Harsco. <http://www.ecoasic.com/pt/apresentacao> (acedido 9.15.19).
- Hart, J., Adams, K., Giesekam, J., Tingley, D.D., Pomponi, F., 2019. Barriers and drivers in a circular economy: the case of the built environment. *Procedia CIRP* 80, 619–624. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.015>

- Hasan, U., Whyte, A., Al Jassmi, H., 2019. Critical review and methodological issues in integrated life-cycle analysis on road networks. *J. Clean. Prod.* 206, 541–558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.148>
- Hauser, A., Eggenberger, U., Mumenthaler, T., 1999. Fly ash from cellulose industry as secondary raw material in autoclaved aerated concrete. *Cem. Concr. Res.* 29, 297–302.
- Hossain, M.U., Poon, C.S., Lo, I.M.C., Cheng, J.C.P., 2016. Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resour. Conserv. Recycl.* 109, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>
- Houston, J., Casazza, E., Briguglio, M., Spiteri, J., 2018. Stakeholder Views Report Enablers and Barriers to a Circular Economy.
- Iberobrita, 2022. Declaração de Desempenho nº 10 IBIV/ ibero. Pombal.
- ILMAR, 2022. Centrais de Betão. <http://www.ilmar.pt/pt/centraisdebetao.php> (acedido 3.8.22).
- INE, 2018. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável Sustainable Development Goals. Instituto Nacional de Estatística, I.P., Lisboa.
- International EPD System, 2018. Product Category Rules: Highways, streets and roads. Stockholm.
- IP, 2014. Caderno de Encargos Tipo Obra - 14 Controlo de qualidade. Lisboa.
- IPQ, 2015. NP EN 13225 - Produtos prefabricados de betão: Elementos estruturais lineares. Lisboa.
- IPQ, 2008. Gestão ambiental Avaliação do ciclo de vida Princípios e enquadramento. Lisboa.
- IPQ, 2006. NP EN 13108-1 Misturas betuminosas – Especificações dos materiais – Parte 1: Misturas betuminosas densas. Lisboa.
- IPQ, 2004a. NP EN 13043 - Apregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Lisboa.
- IPQ, 2004b. NP EN 12620 - Agregados para Betão. Lisboa.
- ISO/TC 207, 2006a. ISO 14040- Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Switzerland.
- ISO/TC 207, 2006b. ISO 14044 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Switzerland.
- ISO/TC 59, 2017. ISO 15686-5: Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. Switzerland.
- Jang, H., Lim, Y.-T., Kang, J.-H., So, S., So, H., 2018. Influence of calcination and cooling

- conditions on pozzolanic reactivity of paper mill sludge. *Constr. Build. Mater.* 166, 257–270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.119>
- Jawahir, I.S., Bradley, R., 2016. Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing, em: *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., pp. 103–108.
- Jia, Y., Maurice, C., Öhlander, B., 2014. Effect of the alkaline industrial residues fly ash, green liquor dregs, and lime mud on mine tailings oxidation when used as covering material. *Environ. Earth Sci.* 72, 319–334. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2953-3>
- Jørgensen, S., Pedersen, L.J.T., 2018. The Circular Rather than the Linear Economy, em: *RESTART Sustainable Business Model Innovation*. Springer International Publishing, pp. 103–120. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91971-3_8
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., Rosado, L., 2018. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resour. Conserv. Recycl.* 135, 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Kalverkamp, M., Helmers, E., Pehlken, A., 2020. Impacts of life cycle inventory databases on life cycle assessments: A review by means of a drivetrain case study. *J. Clean. Prod.* 269, 121329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121329>
- Kim, T., Tae, S., Chae, C., 2016. Analysis of Environmental Impact for Concrete Using LCA by Varying the Recycling Components, the Compressive Strength and the Admixture Material Mixing. *Sustainability* 8, 389. <https://doi.org/10.3390/su8040389>
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour. Conserv. Recycl.* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kizinievič, O., Kizinievič, V., Malaiškienė, J., 2018. Analysis of the effect of paper sludge on the properties, microstructure and frost resistance of clay bricks. *Constr. Build. Mater.* 169, 689–696. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.024>
- Konstantinovas, B., Ventura Bento, N., Sanches, T., 2019. *Economia Circular no Setor da Construção Civil I-Ciclo dos materiais Economia Circular no Setor da Construção Civil I-Ciclo dos materiais Estudos para uma Região RICA Resiliente, Inteligente, Circular e Atrativa*. Lisboa.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., Seppälä, J., 2018. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecol. Econ.* 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Lage, R.F.T., 2013. Equipamento de fabrico, transporte e colocação de betão em obra (Mestrado em

- Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico Lisboa.
- Leitão, A., 2015. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. *Port. J. Financ. Manag. Account.* 1, 149–171. <https://doi.org/10.54663/2183-3826>
- Lemos, P., 2018. A Economia Circular como fator de resiliência e competitividade na região de Lisboa e Vale do Tejo. Lisboa.
- Lenaagregados, 2020. Declaração de Desempenho 01/FA. Fátima.
- Linder, M., Sarasini, S., van Loon, P., 2017. A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *J. Ind. Ecol.* 21, 545–558. <https://doi.org/10.1111/jiec.12552>
- Luis de Oliveira Júnior, A., Pedroti, L.G., de Assis Oliveira, J., Hilarino Fernandes, W.E., Fineza, A.G., Monteiro, S.N., Nalon, G.H., 2019. The influence of partial replacement of natural sand aggregates by grits residues on the mechanical properties of an ecological mortar. *J. Build. Eng.* 26, 100912. <https://doi.org//10.1016/j.biortech.2019.122496>
- Madrid, M., Orbe, A., Carré, H., García, Y., 2018. Thermal performance of sawdust and lime-mud concrete masonry units. *Constr. Build. Mater.* 169, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.193>
- Mäkitalo, M., Mácsik, J., Maurice, C., Öhlander, B., 2015. Improving Properties of Sealing Layers Made of Till by Adding Green Liquor Dregs to Reduce Oxidation of Sulfidic Mine Waste. *Geotech. Geol. Eng.* 33, 1047–1054. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9886-4>
- Mäkitalo, M., Maurice, C., Jia, Y., Öhlander, B., 2014. Characterization of Green Liquor Dregs, Potentially Useful for Prevention of the Formation of Acid Rock Drainage. *Minerals* 4, 330–344. <https://doi.org/10.3390/min4020330>
- Mandeep, Kumar Gupta, G., Shukla, P., 2020. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. *Bioresour. Technol.* 297, 122496. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496>
- Marques, J.I. da S., 2016. Geopolimerização de cinzas e dregs da indústria da pasta de papel (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade de Aveiro.
- Marques, J.S.M., 2015. Contributos para as aplicações dos resíduos da indústria papeleira como matérias-primas noutras indústrias (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.
- Martínez-Lage, I., Velay-Lizancos, M., Vázquez-Burgo, P., Rivas-Fernández, M., Vázquez-Herrero, C., Ramírez-Rodríguez, A., Martín-Cano, M., 2016. Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs. *J. Environ. Manage.* 181, 863–873.

- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.052>
- Martínez, C., Cotes, T., Corpas, F.A., 2012. Recovering wastes from the paper industry: Development of ceramic materials. *Fuel Process. Technol.* 103, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.017>
- Martinho, F., Picado-Santos, L., Capitão, S., 2018. Feasibility Assessment of the Use of Recycled Aggregates for Asphalt Mixtures. *Sustainability* 10, 1737. <https://doi.org/10.3390/su10061737>
- Martins, I.M., 2019. Utilização de materiais provenientes de RCD. Especificações Técnicas. A Circ. no Set. da Construção Boas Práticas na Gestão Resíduos Construção e Demolição.
- Mateus, R., 2004. Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção (Tese de mestrado). Universidade do Minho.
- Matias, D.V.S., 2012. Análise do potencial de valorização dos resíduos de Licor Verde da Indústria de Pasta de Papel (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade de Coimbra.
- Mayer, A., Haas, W., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Nuss, P., Blengini, G.A., 2019. Measuring Progress towards a Circular Economy: A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. *J. Ind. Ecol.* 23, 62–76. <https://doi.org/10.1111/jiec.12809>
- Melo, P.J.M.C. de, 2013. Gestão de resíduos para uma construção sustentável (Doutoramento em em Ciências e Engenharia do Ambiente). Universidade de Aveiro.
- Modolo, R., Benta, A., Ferreira, V.M., Machado, L.M., 2010. Pulp and paper plant wastes valorisation in bituminous mixes. *Waste Manag.* 30, 685–696. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.005>
- Modolo, R., Ferreira, V.M., Machado, L.M., Rodrigues, M., Coelho, I., 2011. Construction materials as a waste management solution for cellulose sludge. *Waste Manag.* 31, 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.017>
- Modolo, R., Senff, L., Tarelho, L.A., Labrincha, J., Ferreira, V.M., 2014. Anaysis of waste management solutions in construction materials, em: Congresso de Inovação na Construção Sustentável. Centro Habitat, Tamengos, pp. 37–45.
- Modolo, R.C.E., 2014. Valorization of solid wastes from cellulose and paper industry (Doutoramento em Ciências e Engenharia do Ambiente). Universidade de Aveiro. <https://doi.org/10773/13961>
- Modolo, R.C.E., Ferreira, V.M., Tarelho, L.A., Labrincha, J.A., Senff, L., Silva, L., 2013. Mortar formulations with bottom ash from biomass combustion. *Constr. Build. Mater.* 45, 275–281.
- Modolo, R.C.E., Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Tarelho, L.A.C., 2014. Lime mud from

- cellulose industry as raw material in cement mortars. *Mater. Construcción* 64, 033. <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00214>
- Modolo, R.C.E., Silva, T., Senff, L., Tarelho, L.A.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Silva, L., 2015. Bottom ash from biomass combustion in BFB and its use in adhesive-mortars. *Fuel Process. Technol.* 129, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.015>
- Molina-Sánchez, E., Leyva-Díaz, J., Cortés-García, F., Molina-Moreno, V., 2018. Proposal of Sustainability Indicators for the Waste Management from the Paper Industry within the Circular Economy Model. *Water* 10, 1014. <https://doi.org/10.3390/w10081014>
- Monte, M.C., Fuente, E., Blanco, A., Negro, C., 2009. Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Manag.* 29, 293–308. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002>
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G.A., Alaerts, L., Van Acker, K., de Meester, S., Dewulf, J., 2019. Circular economy indicators: What do they measure? *Resour. Conserv. Recycl.* 146, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Movilla-Quesada, D., Muñoz, O., Raposeiras, A.C., Castro-Fresno, D., 2018. Thermal susceptibility analysis of the reuse of fly ash from cellulose industry as contribution filler in bituminous mixtures. *Constr. Build. Mater.* 160, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.046>
- Muñoz, P., Letelier, V., Zamora, D., Morales, M.P., 2020. Feasibility of using paper pulp residues into fired clay bricks. *J. Clean. Prod.* 262, 121464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121464>
- Mymrin, V., Cusma, D.F., Nagalli, A., Pichorim, A., Catai, R.E., Pawlowsky, U., 2016. New compositions of the materials from cellulose industry wastes. *Clean Technol. Environ. Policy* 18, 2007–2017. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1129-8>
- National Geographic, 2018. Conheça as Principais Conclusões do Climate Change Leadership Porto | National Geographic. <https://www.natgeo.pt/meio-ambiente/2018/07/conheca-principais-conclusoes-do-climate-change-leadership-porto> (acedido 7.13.19).
- Niero, M., Kalbar, P.P., 2019. Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resour. Conserv. Recycl.* 140, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>
- Nordlander, T., Salei, M., Fifer, K., Ferreira, V., Simoes, F., Paiva, H., Oleaga, A., Martin, S., Cepriá, J.J., Nordlander, T., 2018. paperChain D2.3 - Raw materials supply scenario. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5275082>
- Novais, R.M., Carvalheiras, J., Senff, L., Labrincha, J.A., 2018. Upcycling unexplored dregs and

- biomass fly ash from the paper and pulp industry in the production of eco-friendly geopolymer mortars : A preliminary assessment. *Constr. Build. Mater.* 184, 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.017>
- Novais, R.M., Carvalheiras, J., Senff, L., Seabra, M.P., Pullar, R.C., Labrincha, J.A., 2019. In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor dregs. *J. Clean. Prod.* 220, 630–641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.170>
- Nußholz, J.L.K., Nygaard Rasmussen, F., Milios, L., 2019. Circular building materials: Carbon saving potential and the role of business model innovation and public policy. *Resour. Conserv. Recycl.* 141, 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.036>
- O’Callaghan, R., 2018. Do lixo ao luxo: economia circular e simbiose industrial. *J. Negócios*. <https://www.jornaldenegocios.pt/opiniao/deans-corner/ramon-ocallaghan/detalhe/do-lixo-ao-luxo-economia-circular-e-simbiose-industrial> (acedido 3.17.19).
- Omya, 2020. Omya – Produção. <https://www.omya.com/pages/pt/pt/production.aspx> (acedido 3.15.22).
- Oreto, C., Russo, F., Veropalumbo, R., Viscione, N., Acqua, G.D., Biancardo, S.A., 2021. Solutions Involving Recycled Aggregates and Polymers. <https://doi.org/10.3390/ma14143867>
- Paiva, H., Simões, F., Morais, M., Ferreira, V.M., 2019. Pilot test involving pulp and paper industry wastes in road pavements, em: Vilarinho, C., Castro, F., Gonçalves, M., Fernando, A.. (Eds.), *Wastes: Solutions, Treatments and Opportunities III*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 20–26. <https://doi.org/10.1201/9780429289798-4>
- Park, W.-J., Kim, T., Roh, S., Kim, R., 2019. Analysis of Life Cycle Environmental Impact of Recycled Aggregate. *Appl. Sci.* 9, 1021. <https://doi.org/10.3390/app9051021>
- Pasandín, A.R., Ramírez, A., Cano, M.M., Ignacio, P., 2016. Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with paper industry wastes as filler. *J. Clean. Prod.* 112, 853–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.016>
- Pauliuk, S., 2018. Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. *Resour. Conserv. Recycl.* 129, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.019>
- PE, 2015. Economia circular: definição, importância e benefícios. *Parlam. Eur.* <http://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicao-importancia-e-beneficios> (acedido 7.22.19).

- Peng, B., Cai, C., Yin, G., Li, W., Zhan, Y., 2015. Evaluation system for CO₂ emission of hot asphalt mixture. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed. 2)*, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.005>
- Pheifer, A.G., 2017. *Barriers & Enablers to Circular Business Models A whitepaper by A.G. Pheifer. Le Brielle.*
- Pinho, P.A.M. de, 2014. *Valorização de resíduos em materiais de construção (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro.*
- Pinto, S. de J.F., 2005. *Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves (Mestrado em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos). Universidade de Aveiro.*
- Pradhan, S., Tiwari, B.R., Kumar, S., Barai, S. V., 2019. Comparative LCA of recycled and natural aggregate concrete using Particle Packing Method and conventional method of design mix. *J. Clean. Prod.* 228, 679–691. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.328>
- Qin, J., Cui, C., Cui, X., Hussain, A., Yang, C., Yang, S., 2015. Recycling of lime mud and fly ash for fabrication of anorthite ceramic at low sintering temperature. *Ceram. Int.* 41, 5648–5655. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.149>
- Quina, M.J., Pinheiro, C.T., 2020. Inorganic Waste Generated in Kraft Pulp Mills: The Transition from Landfill to Industrial Applications. *Appl. Sci.* 10, 2317. <https://doi.org/doi:10.3390/app10072317>
- Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., 2009. Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials. *J. Hazard. Mater.* 172, 1049–1060. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.109>
- Reichel, A., Schoenmakere, M. de, Gillabel, J., 2016. *Circular economy in Europe: developing the knowledge base, European Environment Agency. Luxembourg.*
- República Portuguesa: Ambiente, 2017. *Liderar a Transição: Plano de Ação para a Economia Circular em Portugal: 2017-2020.*
- Ribeiro dos Santos, V., Dezena Cabrelon, M., de Sousa Trichês, E., Quinteiro, E., 2019. Green liquor dregs and slaker grits residues characterization of a pulp and paper mill for future application on ceramic products. *J. Clean. Prod.* 240, 118220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118220>
- Rise Processum, 2017. *paperChain D2.1 Baseline Report : PPI waste streams valorisation potential.*
- Rizos, V., Behrens, A., Gaast, W. V., Hofman, E., Ioannou, A., Kafyeke, T., Flamos, A., Rinaldi, R., Papadelis, S., Hirschnitz-Garbers, M., Topi, C., 2016. *Implementation of Circular Economy*

- Business Models by Small and Medium-Sized Enterprises (SMEs): Barriers and Enablers. *Sustain.* 2016, Vol. 8, Page 1212 8, 1212. <https://doi.org/10.3390/SU8111212>
- Roh, S., Kim, R., Park, W.-J., Ban, H., 2020. Environmental Evaluation of Concrete Containing Recycled and By-Product Aggregates Based on Life Cycle Assessment. *Appl. Sci.* 10, 7503. <https://doi.org/10.3390/app10217503>
- Roque, A.J., 2017a. Aplicação de ASIC em aterro e pavimento, em: Neves, J., Freire, A.C., Batista, F. (Eds.), *Materiais tratados e reciclados em infraestruturas de transporte*. LNEC, Lisboa, p. 276.
- Roque, A.J., 2017b. Avaliação da perigosidade ambiental dos agregados reciclados, em: LNEC (Ed.), *Materiais tratados e reciclados em infraestruturas de transporte*. Lisboa, pp. 49–71.
- Roque, A.J., Caldeira, L., Fortunato, E., Gomes Correia, A., Martins, J.P., Ferreira, S., 2010. Trecho experimental no itinerário EN 311 Fafe/Vázea Cova - Observação e monitorização do comportamento mecânico e ambiental. LNEC, Guimarães.
- Saeli, M., Novais, R.M., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2018. Green geopolymeric concrete using grits for applications in construction. *Mater. Lett.* 233, 94–97. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.08.102>
- Saeli, M., Novais, R.M., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2017. Mix design and mechanical performance of geopolymer binder for sustainable construction and building material, em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing.
- Saeli, M., Senff, L., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2019a. Alkali-activated Fly Ash-based Mortars for Green Applications in Architecture and Civil Engineering. *Int. J. Struct. Civ. Eng. Res.* 1–9. <https://doi.org/10.18178/ijscer.8.1.1-9>
- Saeli, M., Senff, L., Tobaldi, D.M., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2019b. Novel biomass fly ash-based geopolymeric mortars using lime slaker grits as aggregate for applications in construction: Influence of granulometry and binder/aggregate ratio. *Constr. Build. Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.024>
- Saeli, M., Tobaldi, D.M., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2019c. Mix design and mechanical performance of geopolymeric binders and mortars using biomass fly ash and alkaline effluent from paper-pulp industry. *J. Clean. Prod.*
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., 2017. How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. *Recycling* 2, 6.
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kendall, A., 2019. A taxonomy of circular economy

- indicators. *J. Clean. Prod.* 207, 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Sala, S., Reale, F., Cristobal-Garcia J, 2016. Life cycle assessment for the impact assessment of policies Life thinking and assessment in the European policies and for evaluating policy options. Luxembourg.
- Saraiva, M.I.E., 2009. Controlo de qualidade: agregados e obra rodoviária (Mestrado em Georecursos). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Shahin, M., Khokon, Z., Sobhan, M., Ahmed, T., 2015. Salt Tolerance Limit of Bituminous Pavement. *Int. J. Civ. Eng.* 2, 1–6. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V2I4P101>
- Sicalpor, 2022. Declaração de desempenho n.02/ SCA 20 (filler). Alenquer.
- Sicobrita, 2015. DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO - pó gravilhado. Pombal.
- Simão, L., Justi, J., Lóh, N.J., Hotza, D., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J.A., Montedo, O.R.K., 2017. Waste-containing clinkers: Valorization of alternative mineral sources from pulp and paper mills. *Process Saf. Environ. Prot.* 109, 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.03.038>
- Siqueira, F.B., Holanda, J.N.F., 2018. Application of grits waste as a renewable carbonate material in manufacturing wall tiles. *Ceram. Int.* 44, 19576–19582. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.203>
- Siqueira, F.B., Holanda, J.N.F., 2013. Reuse of grits waste for the production of soil e cement bricks. *J. Environ. Manage.* 131, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>
- Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., Wzorek, Z., 2015. The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy. *J. Clean. Prod.* 95, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>
- SPRAL, 2022. SPRAL – Qualidade. <https://spral.pt/empresa/2> (acedido 3.15.22).
- Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, R., Santonja Giner, G., Roudier, S., Delgado Sancho, L., 2015. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Comissão Europeia, Luxemburgo. <https://doi.org/10.2791/370629>
- T, Pacheco Torgal, F., Jalali, S., 2007. Construção Sustentável. O Caso dos materiais de construção, em: Universidade de Coimbra (Ed.), Congresso Construção 2007 - 3.º Congresso Nacional. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Tai, H.-S., Chen, C.-H., 2020. Feasibility of transforming lightweight aggregate made of pulp and paper mill sludge into insulating concrete. *J. Chinese Inst. Eng.* 43, 308–318. <https://doi.org/10.1080/02533839.2020.1716849>

- Teixeira, E.R., Mateus, R., Camões, A., Branco, F.G., 2019. Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar. *Constr. Build. Mater.* 197, 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173>
- Teixeira, E.R., Mateus, R., Camões, A.F., Bragança, L., Branco, F.G., 2016. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. *J. Clean. Prod.* 112, 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.124>
- Teixeira, C. A. de M., 2013. Análise de Ciclo de Vida: Princípios metodológicos. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). Vila Real. (Série Didática, Ciências Aplicadas; 438).
- Thelen, D., van Acoleyen, M., Huurman, W., Thomaes, T., van Brunschot, C., Edgerton, B., Kubbinga, B., 2018. *Scaling the Circular Built Environment: pathways for business and government - World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*. Geneva.
- Thives, L.P., Ghisi, E., 2017. Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 72, 473–484. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>
- Tomaz, B.M.N., 2014. Universidade de Aveiro 2014 Departamento de Engenharia Civil Avaliação da sustentabilidade dos materiais de construção (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Torgal, F.P., Jalali, S., 2010. A sustentabilidade dos materiais de construção. TecMinho, Guimarães.
- Torgal, F.P., Jalali, S., 2008. Sustentabilidade Tendências para dos materiais de a sustentabilidade construção. *Eng. e Vida* 42, 460.
- Turk, J., Cotič, Z., Mladenović, A., Šajna, A., 2015. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. *Waste Manag.* 45, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>
- UEPG, 2020. European Aggregates Association A Sustainable Industry for a Sustainable Europe (annual review 2019-2020). Bruxelas.
- VAC, 2018. VAC – Produtos. <https://vac.pt/produtos> (acedido 3.15.22).
- van Sante, M., 2017. *Circular construction Most opportunities for demolishers and wholesalers Sustainable transitions | circular economy*. Amesterdan.
- Varela, N., 2010. Dimensões da construção sustentável. *Pedra Cal* 13 a 15.
- Vashistha, P., Singh, S.K., Dutt, D., Kumar, V., 2019. Sustainable utilization of paper mill solid wastes via synthesis of nano silica for production of belite based clinker. *J. Clean. Prod.* 224, 557–

565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.207>
- Vieira, C.M.F., Pinheiro, R.M., Rodriguez, R.J.S., Candido, V.S., Monteiro, S.N., 2016. Clay bricks added with effluent sludge from paper industry: Technical, economical and environmental benefits. *Appl. Clay Sci.* 132–133, 753–759. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.001>
- Vigobloco, 2021. Controlo de Produção em Fábrica (Número 0866-CPR-2007/CE.0069). URQUEIRA.
- Vilarinho, C., 2019. Incorporação de resíduos em materiais de construção. Circ. no Sect. da Construção, Boas Práticas na Gestão Resíduos Construção e Demolição (RCD).
- Vilarinho, C., Castro, F., Mendonça, B., Coelho, C., 2009. Incorporation of Wastes in Lightweight Aggregate of Expanded Clay for Construction Applications, em: ISWA World Congress 2009.
- Wall, S., 2021. CE Marking of Construction Products—Evolution of the European Approach to Harmonisation of Construction Products in the Light of Environmental Sustainability Aspects. *Sustain.* 2021, Vol. 13, Page 6396 13, 6396. <https://doi.org/10.3390/SU13116396>
- WBCSD, BCSD, 2010. Visão 2050 - A nova agenda para as empresas.
- WBCSD, Climate-KIC, E., 2018. Circular Metrics Landscape Analysis.
- Winans, K., Kendall, A., Deng, H., 2017. The history and current applications of the circular economy concept. *Renew. Sustain. Energy Rev.*
- Xu, J., Deng, Y., Shi, Y., Huang, Y., 2020. A bi-level optimization approach for sustainable development and carbon emissions reduction towards construction materials industry: a case study from China. *Sustain. Cities Soc.* 53, 101828.
- Zanella, 2014. Durability of mixed mortar lining containing dregs-grits. *Am. J. Environ. Sci.* 10, 44–47. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2014.44.47>
- Zanella, B.P., Trannin, C.I.B., 2015. Recycling Residues From the Pulp and Paper Industries in the Civil Construction. *Electron. J. Geotech. Eng.* 20.3.
- Zheng, X., Easa, S.M., Yang, Z., Ji, T., Jiang, Z., 2019. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *J. Clean. Prod.* 213, 659–672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.227>