



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Cidades
Sustentáveis e Inteligentes

Sara Martins

Sara Maria Caravela Almeida Martins

Orientador

Luís Manuel Araújo Santos



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, junho de 2023

AGRADECIMENTOS

É de coração cheio que chego ao final de uma etapa importantíssima e, embora esta dissertação seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, há contributos que não poderia deixar de realçar.

Agradeço, em primeiro lugar, à minha família que tem acompanhado todo o meu percurso académico, a cerca de 400km de distância, e por garantirem que nunca me faltasse nada.

Agradeço, também, a toda a equipa do Grupo Altri pela possibilidade de integrar na equipa de sustentabilidade, em especial à minha orientadora, Cláudia Brites, que me acolheu tão bem desde o primeiro dia e esteve sempre disponível quando as dúvidas surgiam.

A todos os meus professores que me transmitiram conhecimento ao longo destes 2 anos e ao professor Luís Araújo Santos por todos os seus contributos, paciência e disponibilidade para me ajudar em tudo o que foi preciso para a finalização da dissertação. O seu trabalho foi incansável, principalmente nos momentos em que tudo parecia complexo.

Por último, mas não menos importante, não podia deixar de agradecer à minha família de coração, os meus amigos e o meu amor. Estiveram presentes tanto nos bons como nos maus momentos e nunca me deixaram desistir.

A todos, o meu mais sincero, obrigada.

RESUMO

Mais de metade da população mundial vive em áreas urbanas e é expectável que, até 2050, 70% dos cidadãos vivam em áreas urbanas. O constante crescimento populacional levanta novas questões sociais, económicas e ambientais cada vez mais desafiantes. As cidades são as principais responsáveis pelo consumo de energia e pelas emissões de dióxido de carbono, causadas, por exemplo, pela poluição e pelo aumento da produção de resíduos. Para conseguir responder a estes desafios, as Nações Unidas, através da Agenda 2030, dedica um dos ODS às cidades: o objetivo 11 designado de cidades e comunidades sustentáveis. Uma das principais temáticas abordadas no âmbito das cidades sustentáveis são os resíduos e um dos objetivos até 2030 é a redução do impacto ambiental per capita das cidades com especial atenção para a gestão dos resíduos. Nas cidades, a gestão de resíduos engloba os resíduos urbanos e os industriais, existindo diferenças na sua gestão. Por forma a contribuírem para a sustentabilidades das cidades, é do interesse das indústrias reduzir a quantidade de resíduos produzidos no decurso da sua atividade. Em Portugal, em 2020, a indústria transformadora produziu cerca de 2,9 milhões de toneladas, sendo que o setor da fabricação de pasta de papel representou 9% do total. Parte dos resíduos provenientes desse setor são reaproveitados no processo produtivo, no entanto, os resíduos inorgânicos do processo de recuperação de químicos (*grits* e *dregs*) são, atualmente, encaminhados para aterro, dada a complexidade da sua composição. As restrições impostas pela União Europeia, para a redução gradual da deposição de resíduos em aterro, vem obrigar as indústrias a procurar novas soluções para valorização ou reutilização desses resíduos.

A realização deste trabalho tem como objetivo perceber se a incorporação de *grits*, um resíduo resultante da etapa de caustificação na produção de pasta e papel, em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária impacta negativamente o seu desempenho ambiental. Para a realização do estudo, além da mistura betuminosa de referência AC 14 surf 35/50, foram formuladas lajes de pavimento com 5% e 10% de *grits*. Para avaliar o desempenho ambiental dos pavimentos, foram feitos ensaios de percolação de água através da laje e de escoamento superficial com vista à verificação de possíveis impactos ambientais através da análise ao teor de contaminantes presentes nas águas lixiviadas. A análise foi realizada em laboratório externo acreditado. Após uma extensa revisão bibliográfica efetuada sobre as possíveis aplicações de *grits* em serviços, materiais de construção ou outros, dando especial ênfase aos pavimentos rodoviários, verifica-se que vários autores reportam que o impacto dos *grits* na qualidade dos lixiviados é insignificante e não excede os valores-limite estipulados pela legislação. Adicionalmente, a componente de carbonato de cálcio presente nos *grits* confere-lhes a capacidade de remover os metais pesados através da sua precipitação e adsorção. Os resultados obtidos nas análises ao lixiviado percolado e escoado pelas lajes demonstram um excelente comportamento, sendo que a maioria dos contaminantes não atinge o limite de quantificação e nenhum excede o valor-limite de emissão estabelecido pela legislação

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas
no desenvolvimento de novos materiais de construção*

nacional. No entanto, verifica-se a influência dos *grits* em alguns componentes, essencialmente no teor de flúor, carbono orgânico dissolvido e sulfatos.

Sugere-se ainda a realização de estudos mais aprofundados, como, por exemplo, submeter as lajes com incorporação de *grits* a condições atmosféricas adversas e a algum desgaste causado pelo tráfego. Desta forma, será possível perceber se, a longo prazo, a incorporação de *grits* impacta negativamente o solo e os cursos de água.

Palavras-chave: sustentabilidade, resíduos, economia circular, indústria papelreira, *grits*, pavimento rodoviário

ABSTRACT

More than half of the world's population lives in urban areas, and it is expected that by 2050, 70% of citizens will live in urban areas. Constant population growth raises new and increasingly challenging social, economic and environmental issues. Cities are mainly responsible for energy consumption and carbon dioxide emissions, caused, for example, by pollution and increased waste production. To meet these challenges, the United Nations, through the 2030 Agenda, dedicates one of the SDGs to cities: goal 11 called sustainable cities and communities. One of the main issues addressed in the scope of sustainable cities is waste and one of the goals until 2030 is to reduce the per capita environmental impact of cities with special attention to waste management. In cities, waste management includes municipal waste and industrial waste, and there are differences in their management. In order to contribute to the sustainability of cities, it is in the industries' interest to reduce the amount of waste produced in the course of their activities. In Portugal, in 2020, the manufacturing industry produced about 2.9 million tons, with the paper & pulp sector accounting for 9% of the total. Some of the waste from this sector is reused in the production process; however, inorganic waste from the chemical recovery process (*grits* and *dregs*) is currently sent to landfill, due to the complexity of its composition. The restrictions imposed by the European Union for the gradual reduction of waste disposal in landfills has forced industries to seek new solutions for the recovery or reuse of this waste.

This study aims to understand whether the incorporation of *grits*, a residue resulting from the causticizing stage in the production of pulp and paper, in bituminous mixtures for road paving negatively impacts their environmental performance. For the study, in addition to the reference asphalt mixture AC 14 surf 35/50, slabs with 5% and 10% *grits* were formulated. To evaluate the environmental performance of the road pavement, water percolation through the slab and surface runoff tests were performed to verify possible environmental impacts by analyzing the content of contaminants present in the leached water. The analysis was performed in an accredited external laboratory. After an extensive literature review carried out on the possible applications of *grits* in services, construction materials or others, with special emphasis on road pavement, it was verified that several authors report that the impact of *grits* on leachate quality is negligible and does not exceed the limit values stipulated by legislation. Additionally, the calcium carbonate component present in *grits* gives them the ability to remove heavy metals through precipitation and adsorption. The results obtained in the analysis of percolated leachate and run-off from the slabs show excellent behaviour, with most contaminants not reaching the quantification limit and none exceeding the emission limit value established by national legislation. However, it was verified the influence of *grits* in some components, essentially in the fluoride content, dissolved organic carbon and sulphates.

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas
no desenvolvimento de novos materiais de construção*

It is also suggested that further studies be carried out, such as, for example, subjecting the slabs with grits to adverse atmospheric conditions and some wear caused by traffic. In this way, it will be possible to determine whether, in the long term, the incorporation of grits has a negative impact on the soil and water courses.

Keywords: sustainability, waste, circular economy, paper & pulp industry, *grits*, road pavement

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iv
Índice.....	vi
Índice de figuras.....	viii
Índice de quadros	xi
Lista de siglas e acrónimos	xiii
Lista de símbolos	xv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Âmbito da tese.....	2
1.3 Estrutura da tese.....	3
2 A evolução do desenvolvimento sustentável	4
2.1 Desenvolvimento sustentável	4
2.2 Cidades sustentáveis.....	11
2.3 Gestão de resíduos industriais	13
3 O papel da indústria de fibras celulósicas na promoção de cidades mais sustentáveis.....	21
3.1 ALTRI, SGPS e Celbi, S.A. – Caso de estudo.....	26
3.1.1 Breve enquadramento histórico.....	29
3.2 Processo produtivo de fibras celulósicas branqueadas	30
3.2.1 Caracterização dos resíduos da recuperação química	36
4 Valorização de <i>dregs</i> e <i>grits</i>	39
4.1 Potenciais formas de valorização de <i>dregs</i> e <i>grits</i>	39
4.2 Incorporação de <i>grits</i> em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária.....	43
5 Investigação experimental.....	52
5.1 Amostragem.....	52
5.2 Formulação de misturas betuminosas com incorporação de resíduos	53
5.3 Determinação da massa volúmica das lajes de pavimento	55
5.4 Ensaio de percolação através de lajes com vista à verificação de possíveis impactes ambientais.....	57

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas
no desenvolvimento de novos materiais de construção*

5.5	Ensaio de escoamento superficial com vista à verificação de possíveis impactes ambientais.....	61
6	Apresentação e discussão de resultados.....	66
6.1	Determinação da massa volúmica	66
6.2	Percolação através das lajes de pavimento	67
6.3	Escoamento superficial.....	73
7	Conclusões e recomendações.....	79
	Referências bibliográficas	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Os pilares da sustentabilidade (adaptado de Purvis, 2018).....	5
Figura 2.2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (adaptado de UN, 2022b) ..	7
Figura 2.3 - Acordo de Paris (adaptado de WRI, 2022).....	8
Figura 2.4. Pacto Ecológico Europeu (European Council, 2022).....	8
Figura 2.5. Iniciativas incluídas no Pacto Ecológico Europeu (adaptado de European Council, 2022)	9
Figura 2.6. Metas energia e clima de Portugal para o horizonte 2030 (adaptado de República Portuguesa, 2020)	10
Figura 2.7 – Objetivo de Desenvolvimento Sustentável: Cidades e Comunidades Sustentáveis (adaptado de UNEP, 2017).....	11
Figura 2.8. Estratégia Cidades Sustentáveis 2020 (adaptado de DGT, 2015).....	12
Figura 2.9. Resíduos provenientes das atividades económicas, UE27 (Mt) (adaptado de Eurostat, 2022a).....	14
Figura 2.10. Resíduos gerados por atividade económica na UE27, em 2020 (adaptado de Eurostat, 2022a).....	14
Figura 2.11. Hierarquia dos resíduos (adaptado de Diretiva 2008/98/CE de 19 de novembro)	16
Figura 2.12. Resíduos setoriais por tipo de operação de gestão de resíduos (adaptado de INE, 2022)	17
Figura 2.13. Estrutura de resíduos setoriais por principais atividades económicas (adaptado de INE, 2022)	18
Figura 2.14. Modelo antigo para o planeamento da gestão de resíduos, em Portugal (adaptado de APA, 2021).....	19
Figura 2.15. Modelo atual para o planeamento da gestão de resíduos, em Portugal APA, 2021)	19
Figura 3.1. Modelo de economia circular no setor da pasta e papel (CELPA, 2020)	22
Figura 3.2. Produção de pasta de papel por país (membros CEPI) (adaptado de CEPI, 2022).....	24
Figura 3.3. Emissões diretas de GEE por tipo de poluente (Biond, 2022).....	25
Figura 3.4. Destino dos resíduos produzidos por tipo de operação (Biond, 2022) ..	26
Figura 3.5. Presença do Grupo Altri a nível nacional (Altri, 2023)	27
Figura 3.6. Valorização das lamas biológicas provenientes da ETARi (Altri, 2021)	29

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas
no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Figura 3.7. Processo de produção Kraft (adaptado de Tran & Vakkilainen, 2007)	31
Figura 3.8. Diagrama resumido do processo produtivo de fibras celulósicas (adaptado de Celbi, 2021)	31
Figura 3.9. Resíduos processuais produzidos na Celbi	35
Figura 3.10. Resíduos da recuperação química (Altri, 2021)	36
Figura 4.1. Argamassas geopoliméricas com incorporação de <i>dregs</i> (Novais et al., 2018)	42
Figura 4.2. Principais fontes de contaminantes das estradas (adaptado de Dawson, 2007)	44
Figura 4.3. Constituição tipo de um pavimento flexível de base granular (Silva, 2006)	45
Figura 4.4. Requisitos dos fusos granulométricos para as misturas betuminosas a aplicar em camadas com características de desgaste (adaptado de EP, 2014)	47
Figura 4.5. Pavimentação asfáltica de camada de desgaste com integração dos resíduos <i>dregs</i> e <i>grits</i> (adaptado de RAIZ, 2020)	50
Figura 5.1. Materiais utilizados na formulação de misturas betuminosas, excluindo os <i>grits</i>	53
Figura 5.2. Etapas para a formação de uma laje de pavimento rodoviário	54
Figura 5.3. <i>Grits</i> incorporados em lajes de pavimento rodoviário	55
Figura 5.4. Caixas para suportar as lajes de pavimento	55
Figura 5.5. Laje imersa em água para determinação da massa volúmica (SSS)	56
Figura 5.6. Rutura e fissuração de um pavimento degradado com má drenagem (adaptado de Dawson, 2007)	57
Figura 5.7. Escoamento de contaminantes em direção ao solo e às águas subterrâneas (adaptado de Azadgoleh et al., 2022)	58
Figura 5.8. Primeira tentativa ao ensaio de percolação	58
Figura 5.9. Ensaio de percolação	59
Figura 5.10. Escoamento da água pelos cantos da laje de pavimento	59
Figura 5.11. Materiais utilizados nos testes de afinação do caudal	63
Figura 5.12. Etapas para os testes de afinação de caudal	64
Figura 5.13. Materiais necessários para a execução do ensaio de lixiviação	65
Figura 5.14. Etapas para a execução do ensaio de lixiviação das lajes de pavimentos rodoviários	65
Figura 6.1. Relação da massa volúmica entre as diferentes misturas betuminosas	66

Figura 6.2. Variação percentual da massa volúmica comparativamente a 2300 kg/m ³	67
Figura 6.3. Percentagem de água absorvida por cada laje de pavimento rodoviário	67
Figura 6.4. Principais contaminantes do lixiviado percolado nas lajes de pavimento, em relação à laje de referência.....	72
Figura 6.5. Principais contaminantes do lixiviado escoado superficialmente nas lajes de pavimento, em relação à laje de referência.....	77

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1. Metas de redução de emissão de gases com efeito de estufa até 2050 (adaptado de República Portuguesa, 2019)	10
Quadro 3.1. Produtos da indústria de pasta e papel (adaptado de CEPI, 2022b) ...	23
Quadro 3.2. Compromisso 2030 do Grupo Altri (adaptado de Altri, 2023)	28
Quadro 3.3. Resíduos das atividades processuais da Celbi	34
Quadro 3.4. Continuação do Quadro 3.3.....	35
Quadro 3.5. Caracterização dos <i>dregs</i> e <i>grits</i> e valores-limite legais de aterros para resíduos não perigosos (adaptado de Lopes, 2022).....	37
Quadro 3.6. Continuação do Quadro 3.5. (adaptado de Lopes, 2022).....	38
Quadro 4.1. Resumo de possíveis impactes ambientais negativos da pavimentação rodoviária.....	44
Quadro 4.2. Requisitos das misturas betuminosas para uma camada de desgaste AC14 (adaptado de EP, 2014)	46
Quadro 4.3. Requisitos dos agregados para camadas betuminosas com características de desgaste (adaptado de EP, 2014).....	47
Quadro 4.4. Resultados da determinação de parâmetros referentes aos agregados e às misturas betuminosas (adaptado de Lopes, 2022)	51
Quadro 5.1. Quadro-legal para comparação dos resultados	52
Quadro 5.2. Composição das misturas betuminosas com incorporação de resíduos	53
Quadro 5.3. Designação de cada amostra	54
Quadro 5.4. Massa das lajes de pavimento antes e depois do ensaio de percolação	59
Quadro 5.5. Valores-limite estabelecidos pela legislação nacional.....	60
Quadro 5.6. Dados relativos à precipitação da estação de Coimbra/Bencanta 1981-2010 Bencanta (adaptado de IPMA, 2022).....	63
Quadro 5.7. Testes de afinação de caudal	64
Quadro 6.1. Teor de contaminantes no solo após contacto com <i>grits</i> e comparação com valores de referência	69
Quadro 6.2. Resultados obtidos da análise à água percolada através das lajes de pavimento	70
Quadro 6.3. Média e desvio padrão do teor de contaminantes de cada grupo de lajes de pavimento com incorporação de <i>grits</i>	71

Quadro 6.4. Variação absoluta do teor de contaminantes presentes na água percolada pelas lajes de pavimento com incorporação de <i>grits</i> , em relação à laje de referência	71
Quadro 6.5. Qualidade de lixiviados de aterros com presença de <i>grits</i>	74
Quadro 6.6. Resultados obtidos à análise da água escoada superficialmente pelas lajes	75
Quadro 6.7. Média e desvio padrão do teor de contaminantes de cada grupo de lajes de pavimento com incorporação de <i>grits</i>	76
Quadro 6.8. Variação absoluta do teor de contaminantes presentes no lixiviado escoado superficialmente nas lajes de pavimento com incorporação de <i>grits</i> , em relação à laje de referência	76
Quadro 6.9. Comparação dos resultados do ensaio de percolação e de escoamento superficial.....	77

LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS

BEKP	<i>Bleached Eucalyptus Kraft Pulp</i>
BTEX	Benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno
CEPI	Confederação Europeia das Indústrias de Papel
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra
CIRVER	Centro Integrados de Recuperação, Valorização e Eliminação de Resíduos
COD	Carbono orgânico dissolvido
COP21	Conferência das Nações Unidas para as Alterações Climáticas
COT	Carbono orgânico total
CUF	Companhia União Fabril
DDT	Diclorodifeniltricloroetano
DP	Desvio padrão
DQR	Diretiva Quadro de Resíduos
DWP	<i>Dissolved Wood Pulp</i>
EMAS	Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria
FSC	<i>Forest Stewardship Council</i>
GEE	Gases com efeito de estufa
HAP	Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos
I&D	Investigação & Desenvolvimento
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
LER	Lista Europeia de Resíduos
INEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCB	Policlorobifenilos
PEE	Pacto Ecológico Europeu
PEFC	<i>Programme for the Endorsement of Forest Certification</i>
PERNU	Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
PERSU	Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos
PESGRI	Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais
PNAPRI	Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais
PNEC 2030	Plano Nacional de Energia e Clima
PNGR	Plano Nacional de Gestão de Resíduos
PPP	Pacto Português para os Plásticos
PSI	Portugal <i>Stock Index</i>
RGGR	Regime Geral de Gestão de Resíduos
RNC 2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica

EU	União Europeia
UN	<i>United Nations</i>
UNFCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas

LISTA DE SÍMBOLOS

A_L	Área da laje
Al	Alumínio
Ba	Bário
Ca	Cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Cl ⁻	Cloreto
Cr	Crómio
Cu	Cobre
d	Distância na horizontal
DP^*	Total de dias de precipitação “ativa”
Fe	Ferro
h	Altura do desnível
i	Inclinação
K	Potássio
m_1	Massa da laje seca
m_2	Massa da laje dentro de água
m_3	Massa da laje seca à superfície saturada
Mg	Magnésio
Na	Sódio
Na_2CO_3	Carbonato de sódio
Na_2S	Sulfato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
Ni	Níquel
P	Fósforo
$\overline{Pd}$	Precipitação média diária
$\overline{Pa}$	Precipitação média anual
Pd'_i	Quantidade diária de água a aplicar na laje
S	Enxofre
Si	Silício
Zn	Zinco
ρ_{bssd}	Massa volúmica
ρ_w	Massa da água à temperatura do ensaio

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

No século XXI deu-se início à implementação de várias estratégias de mitigação e adaptação aos imensos desafios ao desenvolvimento sustentável, que surgiram no século anterior como consequência da Revolução Industrial e Globalização. Um dos principais desafios é a questão das alterações climáticas, que causam impactos significativos no planeta, na saúde pública e na economia, comprometendo a capacidade de todos os países contribuírem para a sustentabilidade mundial (UN, 2015). Como aspetos negativos poderemos referir o esgotamento dos recursos naturais e os impactos ambientais adversos, tais como a desertificação, a seca, a degradação dos solos, a escassez de água e a perda de biodiversidade sobrecarregam a lista de desafios enfrentados pela humanidade (UN, 2015).

Na organização e ordenamento das cidades, o crescimento populacional levanta novos desafios sociais, económicos e ambientais relacionados com o aumento da desigualdade social, ausência de serviços básicos, poluição, aumento da produção de resíduos, entre outros. Para conseguir responder a estes desafios, as Nações Unidas criaram a Agenda 2030 e dedicaram um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) às cidades: o objetivo 11 designado de *cidades e comunidades sustentáveis*. Nas cidades, a sustentabilidade deve ser considerada um processo adaptativo que considera questões económicas, sociais e ambientais de uma forma integrada. Ambicionam-se cidades que incentivam a um estilo de vida saudável e promovam os recursos locais, que tenham capacidade de responder às necessidades dos diferentes tipos de grupos populacionais, bem como cidades que estejam ligadas ao mundo e que potenciem a economia local através de mercados internacionais.

Um dos objetivos até 2030, o 11.6, é a redução do impacto ambiental *per capita*, associado à problemática da gestão de resíduos nas cidades, que engloba os resíduos urbanos e os industriais (UN, n.d.). Na Europa, 90% dos resíduos produzidos são provenientes das atividades económicas (Eurostat, 2022), tendo como principais produtores o setor da construção, da indústria extrativa e da indústria transformadora (Eurostat, 2022a). Em Portugal, a indústria transformadora representa 42% dos resíduos industriais produzidos, sendo o setor da fabricação de pasta e papel o principal produtor (INE, 2022). Um dos principais desafios com que as empresas se deparam na gestão de resíduos é a falta de infraestruturas com operações de valorização, dada a diversidade e complexidade dos resíduos produzidos que acabam por ser encaminhados para aterro sanitário. Com os regulamentos ambientais cada vez mais exigentes, a partir de 2030, prevê-se a criação de medidas adequadas para aplicar restrições à deposição em aterro de

todos os resíduos adequados para reciclagem, reutilização ou valorização energética, respeitando a hierarquia dos resíduos (Diretiva (UE) 2018/850, de 30 de maio de 2018). Este enquadramento vem reforçar a necessidade de as empresas investirem no desenvolvimento de soluções sobre o potencial de valorização dos seus resíduos através da criação de industriais e com a comunidade académica. No entanto, o licenciamento de resíduos como subprodutos é um processo complexo e demorado o que representa, igualmente, um desafio para as empresas (PaperChain, 2021a).

Durante o século XX, os possíveis impactes ambientais da indústria da pasta e papel foram considerados significativos, nomeadamente nas questões relacionadas com aquecimento global, ecotoxicidade, toxicidade humana, acidificação e produção de resíduos (Söderholm et al., 2019). Atualmente, a indústria papelreira é um exemplo de economia circular dada a reutilização interna e a valorização energética de grande parte dos seus resíduos. A indústria papelreira tem, também, vindo a responder aos desafios que se colocam através da criação de novos produtos com potencial de substituir alguns, como os plásticos de utilização única, que vão servir outras indústrias (BIOND, 2022). Em Portugal, a indústria transformadora produz 42% dos resíduos industriais, sendo o setor da produção de pasta e papel o principal produtor, em termos de quantidade (INE, 2022).

A Altri é um grupo europeu de referência na produção de fibras celulósicas e detém duas unidades industriais para a produção de fibras celulósicas branqueadas, a Celbi e a Biotek, e uma outra para a produção de fibras celulósicas solúveis, a Caima. Na sua subsidiária Celbi, os resíduos que revelam maior preocupação são os *dregs* e os *grits* por serem de grande volume de produção e, atualmente, em grande parte, encaminhados para aterros sanitários de resíduos não perigoso. Para responder às restrições colocadas para deposição de resíduos em aterros sanitários, os *dregs* e os *grits* têm sido alvo de vários estudos para avaliar a viabilidade de aplicação destes resíduos noutros materiais.

1.2 Âmbito da tese

Este trabalho vem contribuir para o desenvolvimento de novos materiais de construção com a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas.

O principal objetivo é testar o potencial de incorporação de *grits* em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários com vista à verificação de possíveis impactes ambientais através de ensaios laboratoriais de percolação e de escoamento superficial.

O ensaio de percolação vai permitir analisar o teor de contaminantes transportados até ao solo e, consecutivamente, analisar a capacidade drenante da laje. Com o ensaio de escoamento superficial, procura-se analisar o comportamento químico do lixiviado relativamente aos poluentes presentes. É

feita uma comparação com a legislação existente relacionada com a qualidade das águas residuais descarregadas em meio hídrico e a qualidade do lixiviado dos aterros sanitários.

1.3 Estrutura da tese

A presente dissertação encontra-se organizada sob a forma de capítulos, num total de sete e está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 2 – procurou-se justificar a pertinência do tema da dissertação, abordando temáticas relacionadas com o desenvolvimento sustentável, a importância da criação de cidades mais sustentáveis e como a gestão de resíduos industriais influencia o desenvolvimento sustentável.
- Capítulo 3 – é feito um breve enquadramento sobre o papel da indústria papelreira na promoção de cidades sustentáveis. É apresentada a Altri, como um grupo europeu de referência na produção de fibras celulósicas, e a Celbi, como sua subsidiária e entidade facilitadora dos resíduos para o desenvolvimento deste trabalho. É, igualmente, abordado o processo produtivo de fibras celulósicas e respetivos resíduos processuais, com especial foco nos resíduos da recuperação química.
- Capítulo 4 – é feita uma revisão da literatura sobre as possíveis formas de valorização de *dregs* e *grits*, colocando, em foco, a incorporação de *grits* em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários.
- Capítulo 5 – é abordado o procedimento experimental e ensaios realizados para explorar a viabilidade, a nível ambiental, da incorporação de *grits* em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária, bem como possíveis impactes.
- Capítulo 6 – são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de percolação e de escoamento superficial das lajes de pavimento rodoviário.
- Capítulo 7 – lembram-se os aspetos principais da realização deste trabalho, identificam-se limitações e dão-se algumas orientações para futuros desenvolvimentos desta temática.

2 A EVOLUÇÃO DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2.1 Desenvolvimento sustentável

As alterações no clima associadas a causas naturais, como as quatro estações ou as diferentes regiões do globo, existem desde sempre. No entanto, após a revolução industrial, os problemas ambientais começaram a intensificar-se rapidamente, surgindo o conceito de alterações climáticas para descrever as alterações no clima associadas à atividade humana (UN, n.d.-b). A desflorestação, o uso de fertilizantes e pesticidas, a queima de combustíveis fósseis e a emissão de gases provenientes da indústria têm vindo a afetar negativamente os ecossistemas no planeta Terra (UN, n.d.-b). Provocam a destruição da camada de ozono, aumentam a temperatura da Terra e causam o aumento do nível das águas do mar, introduzindo substâncias tóxicas na cadeia alimentar tanto dos seres humanos como dos animais. Estes impactos começaram a ser discutidos pelos líderes de todo o Mundo, de forma a proteger as pessoas, os recursos naturais, bem como a economia.

Um dos marcos mais importantes para a resolução dos problemas ambientais foi o livro escrito por Rachel Carson, em 1962, “A Primavera Silenciosa”, após o aparecimento do primeiro pesticida, o DDT (diclorodifeniltricloroetano). Este pesticida foi desenvolvido para combater a malária, tifo e outras doenças transmitidas por insetos, mostrando-se, também, eficaz nas produções agrícolas. A desmedida utilização do DDT rapidamente se transformou numa ameaça pela sua toxicidade para os ecossistemas e por tornar as pragas cada vez mais resistentes (EPA, 2023). A autora, através deste livro, teve como objetivo alertar a sociedade e os governos para o perigo da aplicação de pesticidas na natureza e para os impactos que a sua aplicação teria na fauna, na cadeia alimentar e na saúde da população (NRDC, 2015). “A Primavera Silenciosa” marcou o século XX e a sua mensagem ecoa, ainda nos dias de hoje, quando se discutem as temáticas ambientais.

A primeira grande reunião mundial focada na problemática ambiental, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em 1972, reuniu e veio inspirar representantes de 113 países para orientar a população na preservação e valorização do meio ambiente. Marcou o início de um diálogo entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento sobre a importância dos temas ambientais, económicos e sociais (UN, 2022).

Anos mais tarde, formou-se a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento que, em 1987, publicou o Relatório de Brundtland: “*Our Common Future*”. Este Relatório identificou os principais problemas ambientais globais, explicando as suas causas e consequências, e apelou a uma estratégia de desenvolvimento que integrasse o ambiente, a sociedade e a economia, surgindo assim o conceito de “Desenvolvimento Sustentável”. Este conceito é definido

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

como “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades” e apresenta a possibilidade de ser criada uma nova era que garanta o equilíbrio entre o crescimento económico, o cuidado com o ambiente e o bem-estar social. Assim, torna-se crucial que, mundialmente, cada um faça o que estiver ao seu alcance para contribuir para um desenvolvimento sustentável. É preciso que a sociedade adote estilos de vida que respeitem os recursos do planeta, que as atividades económicas garantam alternativas aos combustíveis fósseis e que os governos implementem políticas e regulamentos com orientações para a vida futura no planeta.

Os três principais pilares do desenvolvimento sustentável baseiam-se em três dimensões, ambiental, social e económica (Figura 2.1). A dimensão ambiental foca-se na gestão de recursos naturais, na avaliação dos impactes da atividade humana no ar, na água, nos oceanos, nas florestas e outros, envolvendo legislação e regulamentos para o seu efeito. A dimensão social atua, principalmente, nos direitos humanos, nos temas da justiça social, da paz, da promoção de igualdade de oportunidades, da educação, do acesso aos serviços de saúde bem como do combate à pobreza (Rinalducci, 2022). A dimensão económica aborda diversas questões relacionadas, por exemplo, com o comércio, o desenvolvimento e crescimento das atividades económicas garantindo a viabilidade das organizações e atividades na geração de riqueza e na promoção de emprego digno (BCSD, 2022).

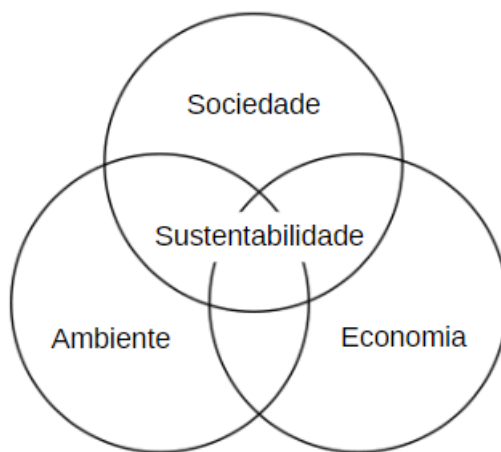


Figura 2.1 - Os pilares da sustentabilidade (adaptado de Purvis, 2018)

A Conferência de Estocolmo, realizada em 1972, e o Relatório Brundtland impulsionaram um novo e importante evento: a Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro, em 1992. Nesta conferência, foi discutido o Relatório de Brundtland e a necessidade de adotar uma agenda que tivesse em conta os desafios previamente discutidos com objetivos que contribuíssem para o desenvolvimento sustentável e as respetivas metas a atingir. Neste sentido, foi adotada, por cerca de 178 países, a Agenda 21, um

programa de ação para o Desenvolvimento Sustentável do século XXI que promoveu parcerias entre os diversos países, visando a melhoria da qualidade de vida e a proteção do ambiente.

Em 1997, foi adotado por 122 países o Protocolo de Quioto, derivado da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (UNFCCC), entrando em vigor apenas em 2005. Foi o primeiro tratado jurídico internacional que teve como principal objetivo limitar as emissões quantificadas de gases com efeito de estufa (GEE) dos países desenvolvidos durante o período de implementação, entre 2008 e 2012 (APA, 2022).

A fim de adotar formalmente uma nova agenda de desenvolvimento, em setembro de 2015, foi convocada a Cimeira das Nações Unidas para um Desenvolvimento Sustentável, em Nova Iorque, que reuniu mais de 150 líderes mundiais. Desta Cimeira resultou o documento “Transformar o nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável” que se resume num plano de ação focado nas pessoas, no planeta, na prosperidade, na paz e nas parcerias mundiais. Este documento estabelece os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), Figura 2.2, desdobrados em 169 metas que, numa parceria global, são um apelo urgente à ação de todos os países, quer sejam desenvolvidos ou em desenvolvimento, envolvendo os governos, as empresas e toda a sociedade civil (UN, 2022b). Os governos são responsáveis por transformar os ODS em planos de ação, políticas e iniciativas capazes de retratar a realidade de cada país. A sociedade deve repensar os padrões de consumo atuais e adotar um estilo de vida mais consciente, responsável e minimalista, bem como incentivar as empresas a tornarem-se mais sustentáveis. As empresas serão cada vez mais valorizadas pela adoção de práticas responsáveis e inclusivas que respeitem o ambiente e os direitos humanos e, por isso, devem conseguir responder às necessidades da sociedade, sendo sempre transparentes quando reportam o impacto dos seus produtos. Os ODS são integrados e transversais aos pilares da sustentabilidade. Esta Agenda foi adotada por todos os Estados-Membros das Nações Unidas e caminha, até 2030, para três destinos essenciais: erradicar a pobreza extrema, combater a desigualdade e a injustiça e solucionar as alterações climáticas (UN, 2022b). Não obstante, a pandemia COVID-19 veio inverter anos de progresso. Milhões de pessoas voltaram, forçadamente, à pobreza e à fome, milhões de empregos a tempo inteiro foram perdidos e os serviços de saúde ficaram sem capacidade de resposta. O Relatório de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas de 2021 menciona, também, que a pandemia expôs e intensificou as desigualdades dentro e entre países (UN, 2021).

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*



Figura 2.2 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (adaptado de UN, 2022b)

Ainda em 2015, em dezembro, na Conferência das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (COP21), em Paris, foi definido o Acordo de Paris. É um tratado internacional juridicamente vinculativo, que entrou em vigor a 4 de novembro de 2016, e foi assinado por cerca de 195 governos ou regiões administrativas, entre os quais se destacam os Estados Unidos, a China e a União Europeia. Por forma a contribuir e complementar os ODS, este acordo foca-se essencialmente em:

- reduzir substancialmente as emissões de gases com efeito de estufa para limitar o aumento de temperatura para 1,5 °C, sendo o máximo 2 °C;
- reavaliar os compromissos de cada país a cada 5 anos;
- providenciar financiamento aos países em desenvolvimento para mitigar as alterações climáticas.

Adicionalmente, o Acordo de Paris tende a ficar mais exigente ao longo dos anos. Os países devem submeter compromissos cada vez mais ambiciosos, avaliados em ciclos de 5 anos (Figura 2.3) e desenvolver estratégias a longo prazo para a neutralização das emissões de GEE, visando alcançar os objetivos do Acordo. Os signatários devem ser totalmente transparentes na comunicação das suas ações e metas para a mitigação e adaptação às alterações climáticas.

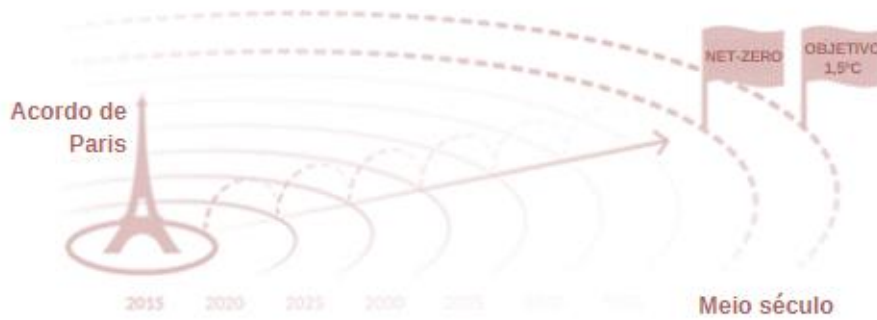


Figura 2.3 - Acordo de Paris (adaptado de WRI, 2022)

A Comissão Europeia, empenhada em tornar-se o primeiro continente neutro em emissões de GEE, em linha com os objetivos do Acordo de Paris, apresentou em 2019 o Pacto Ecológico Europeu (PEE), ou *European Green Deal* (Figura 2.4) para a União Europeia (UE) e para os seus cidadãos. O PEE surge como resposta aos desafios climáticos e ambientais que, atualmente, a Europa atravessa e apresenta-se como “uma nova estratégia de crescimento que visa transformar a UE numa sociedade equitativa e próspera, dotada de uma economia moderna, eficiente na utilização dos recursos e competitiva, que, em 2050, tenha zero emissões líquidas de gases com efeito de estufa e em que o crescimento económico esteja dissociado da utilização dos recursos.” (CE, 2019). A Comissão propõe um pacote ambicioso de medidas e iniciativas numa abordagem holística e transversal a todos os setores, nomeadamente: o clima, o ambiente, a energia, os transportes, a indústria, a agricultura e as finanças sustentáveis. O PEE integra, ainda, a Agenda 2030 e o Acordo de Paris na estratégia de transição para uma Europa mais sustentável.

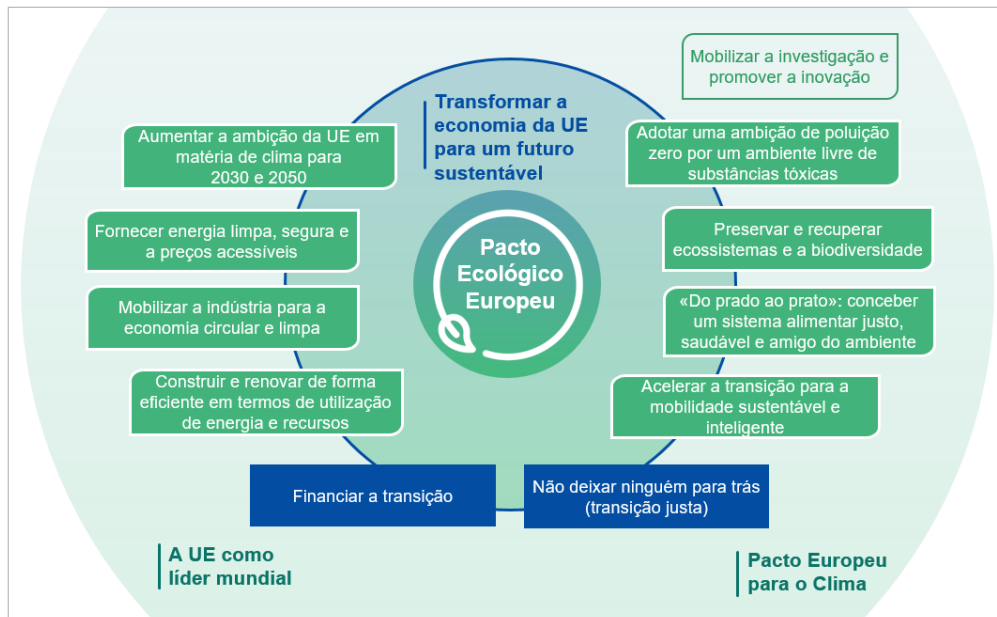


Figura 2.4. Pacto Ecológico Europeu (European Council, 2022)

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Na Figura 2.5, estão mencionadas algumas das iniciativas incluídas no PEE. O Pacote “*Fit for 55*” vem legislar as medidas propostas no PEE, ou seja, propõe a revisão de políticas relacionadas com o clima, energia e transportes, colocando em vigor nova legislação alinhada com os objetivos climáticos da União Europeia. A Lei Europeia do Clima transforma a ambição política de se tornar o primeiro continente neutro em emissões de GEE numa obrigação legal para a UE. Assim, os países membros devem comprometer-se a reduzir as suas emissões até, pelo menos, 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990. A Estratégia Europeia para a Indústria tem como objetivo suportar a transição industrial tradicional para uma indústria sustentável, investindo na investigação, na inovação tecnológica bem como na transformação digital. O Plano de Ação para a Economia Circular prevê tópicos de ação sobre a produção de produtos sustentáveis, a circularidade dos respetivos processos produtivos e, também, procura reforçar o poder de decisão dos consumidores para efetuarem compras mais conscientes. Tem como principal foco os setores eletrónicos e das tecnologias da informação e comunicação, as baterias, o embalamento, os plásticos, a construção e os edifícios, os têxteis e os alimentos.



Figura 2.5. Iniciativas incluídas no Pacto Ecológico Europeu (adaptado de European Council, 2022)

No contexto português, várias medidas têm vindo a ser implementadas. O Conselho de Ministros aprovou, em 2019, dois documentos fulcrais para a concretização dos objetivos do PEE: em junho, o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050), aprovado na Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 e, em dezembro, o Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 53/2020. Estes dois documentos complementam-se, sendo que o RNC 2050 foi desenvolvido em articulação com a preparação do PNEC 2030.

O RNC 2050 estabelece a trajetória para atingir a neutralidade carbónica em Portugal até 2050, identifica os principais vetores de descarbonização em todos os setores da economia e aponta as opções mais eficazes em diferentes cenários de desenvolvimento socioeconómico. A neutralidade carbónica é definida como o ponto de equilíbrio, isto é, um balanço neutro entre as emissões de GEE e o seu sequestro da atmosfera. Para atingir este fim, é necessário reduzir a emissão de gases com efeito de estufa entre 85% e 90% até 2050, como resume o Quadro 2.1, através da total descarbonização da indústria e da mobilidade urbana, apostando numa economia sustentada por recursos renováveis e assente em modelos de economia circular, entre outras iniciativas. As restantes emissões devem ser compensadas através do sequestro de carbono pelas florestas e outros usos do solo. Este plano terá um impacto bastante positivo na economia e na criação de emprego, bem como na melhoria da qualidade do ar e, consecutivamente, melhor qualidade de vida da população (República Portuguesa, 2019)

Quadro 2.1. Metas de redução de emissão de gases com efeito de estufa até 2050 (adaptado de República Portuguesa, 2019)

Metas de redução de emissão de gases com efeito de estufa em relação a 2005	
2030	45% a 55%
2040	65% a 75%
2050	85% a 90%

O PNEC 2030 é o principal instrumento de política energética e climática para a década de 2021-2030. Surge no quadro das obrigações estabelecidas pelo Regulamento da Governação da União da Energia e da Ação Climática, que define que todos os Estados-Membros devem submeter um plano com metas e objetivos nacionais. O PNEC 2030 abrange cinco dimensões: descarbonização, eficiência energética, segurança de abastecimento, mercado interno da energia e investigação, inovação e competitividade (APA, 2022). Estabelece novas metas nacionais (Figura 2.6), incluindo setoriais, e define as linhas de ação e medidas para a descarbonização da sociedade em articulação com o RNC 2050.

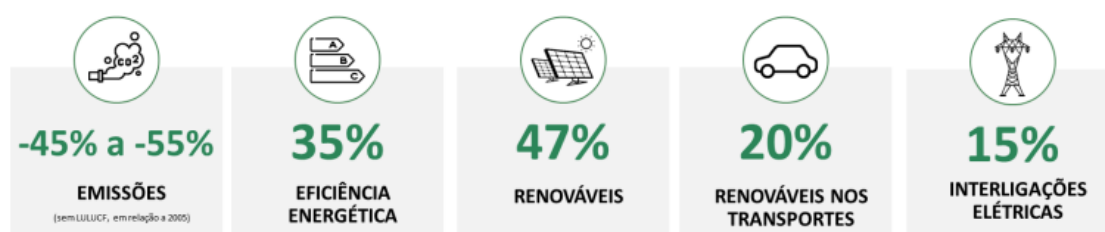


Figura 2.6. Metas energia e clima de Portugal para o horizonte 2030 (adaptado de República Portuguesa, 2020)

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

Por forma a garantir o cumprimento das metas estabelecidas, sejam internacionais ou nacionais, é crucial a cooperação de todos os envolvidos no desenvolvimento sustentável desde o cidadão comum às empresas e indústrias presentes em todas as cidades. As cidades são um elemento muito importante a considerar na tomada de decisões e medidas para a sustentabilidade do planeta. É nas cidades que estão concentradas a maioria das atividades económicas que potenciam o emprego, a competitividade e a inovação.

2.2 Cidades sustentáveis

A população das cidades é responsável por 80% do consumo de energia e por 75% das emissões de dióxido de carbono (UN, 2022a). Segundo a ONU, atualmente 55% da população mundial vive em áreas urbanas e é expectável que esta proporção aumente para 70% até 2050. Associados a este crescimento populacional, levantam-se novos desafios sociais, económicos e ambientais como o aumento da desigualdade social, ausência de serviços básicos, poluição, alterações climáticas, aumento da produção de resíduos, entre outros.

Para conseguir respostas a estes desafios, as Nações Unidas, através da Agenda 2030, dedica um dos ODS às cidades: o objetivo 11 designado de cidades e comunidades sustentáveis. Este ODS pretende promover cidades e comunidades inclusivas, seguras, resilientes e muito mais, tal como se ilustra na Figura 2.7. Este objetivo desdobra-se em 10 medidas que envolvem, entre outras, adotar de políticas integradas, assegurar o acesso a serviços básicos de saúde, bem como o acesso a opções de transporte mais sustentáveis e tornar os espaços públicos mais verdes protegendo e salvaguardando o património cultural e natural.



Figura 2.7 – Objetivo de Desenvolvimento Sustentável: Cidades e Comunidades Sustentáveis (adaptado de UNEP, 2017)

Não existe ainda um conceito definido para “cidade sustentável”, no entanto, tendo em conta alguns conceitos já conhecidos como “desenvolvimento sustentável” e “urbanismo sustentável”, a cidade sustentável é uma cidade desenhada, construída e gerida de modo que os cidadãos sejam capazes de satisfazer as suas necessidades sem pôr em causa o equilíbrio do mundo natural e as condições de vida das outras pessoas, no futuro. A solidariedade intergeracional é parte integrante dos conceitos relacionados com a sustentabilidade, pois vem impôr ao Estado e a sociedade, em geral, garantam que todas as gerações, incluindo as futuras, tenham direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado (Reis & Campello, 2018; UN, 1993). A sustentabilidade nas cidades deve ser considerada um caminho ou um processo adaptativo que considera questões económicas, sociais, ambientais e de governança de uma forma integrada (AEA, 2019).

A estratégia “Cidades Sustentáveis 2020”, uma proposta de âmbito nacional para um futuro mais sustentável das cidades portuguesas, aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 61/2015, apresenta a necessidade de as cidades atuais se transformarem em cidades mais prósperas, resilientes, saudáveis, justas, inclusivas e conectadas (Figura 2.8). Ambicionam-se cidades que oferecem elevados padrões de qualidade de vida, que observam tendências e desenvolvem mecanismos flexíveis de resposta aos desafios. Adicionalmente, cidades que incentivam um estilo de vida saudável e promovam os recursos locais, que tenham capacidade de responder às necessidades dos diferentes tipos de grupos populacionais, bem como cidades que estejam ligadas ao mundo e que potenciam a economia local através de mercados internacionais.

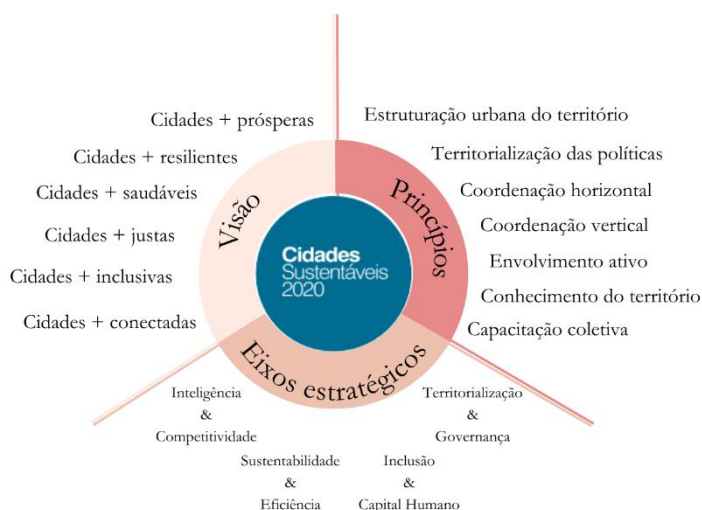


Figura 2.8. Estratégia Cidades Sustentáveis 2020 (adaptado de DGT, 2015)

Uma das principais temáticas abordadas no âmbito das cidades sustentáveis são os resíduos e, de acordo com o eixo 11.6 dos ODS, um dos objetivos até 2030 é a redução do impacto ambiental *per capita* das cidades com especial atenção para a gestão dos resíduos. Nas cidades, a gestão de resíduos engloba os resíduos

urbanos, incluindo os de recolha indiferenciada e de recolha seletiva, e os industriais, existindo diferenças na sua gestão. Os resíduos urbanos são geridos por entidades responsáveis pelo sistema municipal, intermunicipal ou multimunicipal de gestão de resíduos urbanos, que devem assegurar a sua recolha e tratamento (Decreto-Lei nº 102-D/2020, de 10 de dezembro). Relativamente aos resíduos industriais, a responsabilidade pela sua gestão, incluindo os respetivos custos, cabe ao produtor do produto, podendo ser assumida a título individual ou transferida para um sistema integrado, nos termos da legislação específica. A gestão desses resíduos deverá ser feita através de um operador devidamente licenciado para o efeito. No entanto, uma indústria pode, igualmente, produzir resíduos urbanos provenientes de atividades não processuais. Neste caso, e se a quantidade for inferior a 1100 L/dia, a recolha está abrigada pelo sistema municipal para recolha desses resíduos.

No seguimento do ODS 11, as indústrias, também, procuram reduzir a quantidade de resíduos produzidos, por forma a contribuírem positivamente para a sustentabilidade. Como este trabalho vem propor uma alternativa à deposição em aterro de *grits*, um resíduo proveniente da indústria de pasta e papel, importa perceber como funciona a gestão de resíduos industriais.

2.3 Gestão de resíduos industriais

A Revolução Industrial, que teve início no século XVII, foi o ponto de viragem na História para a substituição das pessoas por máquinas e, consecutivamente, para o aumento da população, mudança nos padrões de vida da sociedade e o início da economia capitalista (National Geographic, 2022).

As atividades económicas têm um papel fundamental na sociedade, pois a produção de bens e serviços é essencial para o crescimento económico e contribuem para os padrões de vida atuais. No entanto, estas atividades podem ter diversos impactos negativos tanto no ambiente como na saúde humana, provenientes da produção de resíduos, emissão de efluentes gasosos e líquidos, entre outros.

A nível europeu, os resíduos provenientes das atividades económicas representam cerca de 90% dos resíduos produzidos (Eurostat, 2022). Apesar da quantidade de resíduos gerados nestas atividades, as tendências apontam para uma estabilização da sua produção, sendo que os resíduos do desenvolvimento económico são considerados cada vez mais um recurso valioso para a economia europeia (AEA, 2019). Como demonstra a Figura 2.9, em 2020, foram produzidos, aproximadamente, 1947 milhões de toneladas de resíduos que, devido à pandemia Covid-19, representam um valor mais baixo comparativamente aos anos anteriores.

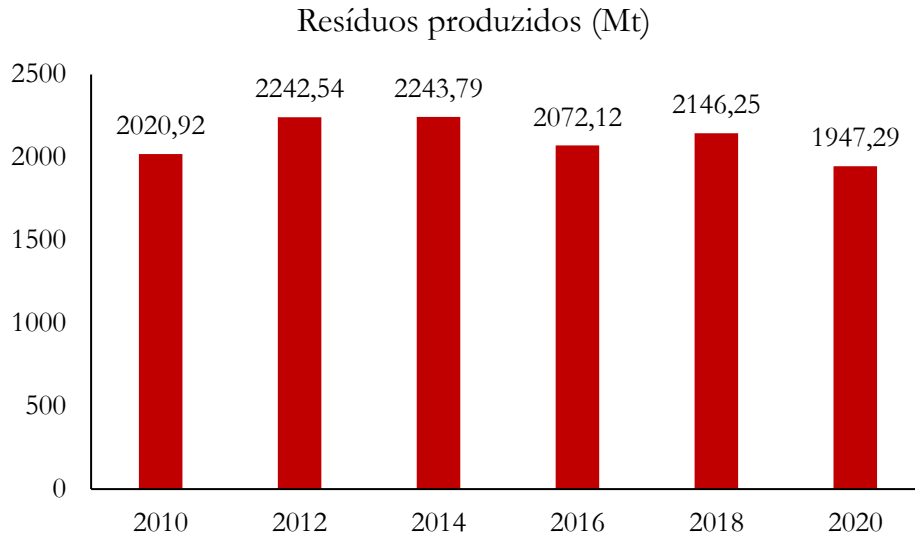


Figura 2.9. Resíduos provenientes das atividades económicas, UE27 (Mt) (adaptado de Eurostat, 2022a)

Os setores de atividade económica relativos à construção, indústria extrativa e indústria transformadora são os principais setores produtores de resíduos, como se pode verificar na Figura 2.10, sendo responsáveis por 41 %, 26 % e 12 %, respetivamente. Os resíduos destes setores são muito diversificados e complexos, o que, para as empresas, pode gerar dificuldades na sua gestão adequada e eficiente. Na falta de infraestruturas com operações de valorização, estes são encaminhados para aterros, podendo afetar significativamente o meio ambiente e, consequentemente, a saúde pública. A contaminação do solo e dos cursos de água, emissões gasosas, impactes negativos na fauna e flora são apenas alguns dos possíveis impactes causados pela deposição destes resíduos em aterro (Losurdo, 2022).

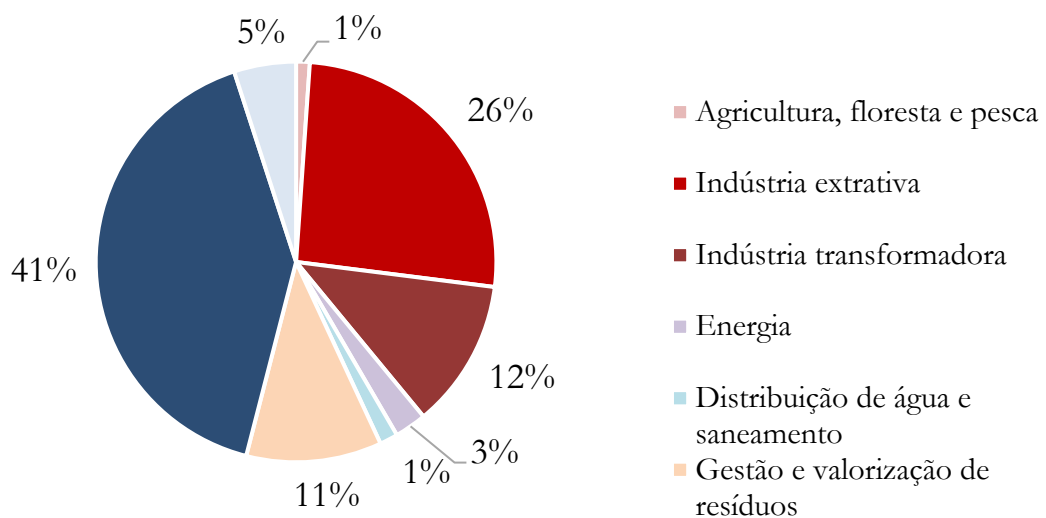


Figura 2.10. Resíduos gerados por atividade económica na UE27, em 2020 (adaptado de Eurostat, 2022a)

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Por forma a mitigar estes impactes, a União Europeia tem vindo a criar regulamentos e diretivas com o objetivo de desenvolver um modelo de atividade industrial sustentável que tenha em conta o crescimento económico, o desenvolvimento tecnológico e a proteção do ambiente. Assim, foi elaborada a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008, mais conhecida como Diretiva Quadro de Resíduos (DQR), sendo, depois, alterada pela Diretiva (UE) 2018/851, que estabelece o enquadramento legal para o tratamento dos resíduos na União Europeia. Esta Diretiva visa a proteção do ambiente e da saúde humana, salientando a importância de uma gestão de recursos eficiente, bem como a valorização e reciclagem de resíduos. A Diretiva faz a distinção entre resíduo e subproduto, definindo o primeiro como qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer. Por sua vez, subproduto é uma substância ou objeto resultante de um processo de produção cujo principal objetivo não seja a produção dessa mesma substância ou objeto. Nesta Diretiva são, também, estabelecidas as condições para que não sejam considerados resíduos. No artigo 7º da DQR é definida a Lista Europeia de Resíduos, LER, publicada pela Decisão 2014/955/UE, da Comissão, de 18 de dezembro, que consiste numa lista harmonizada que tem em consideração a origem e composição dos resíduos, incluindo os perigosos, por forma a facilitar a classificação e identificação dos mesmos. Todos os Estados-Membros devem aplicar a LER na gestão dos seus resíduos. No âmbito da política de prevenção e gestão de resíduos, é estabelecida a hierarquia dos resíduos, Figura 2.11, tendo como propósito a minimização dos impactes adversos decorrentes da produção e da gestão de resíduos e a melhoria da eficiência dos recursos. Assim, devem ser adotadas medidas tendo em conta as opções mais favoráveis para a valorização dos resíduos, pois aqueles que sejam submetidos a alguma dessas opções deixam de ser considerados resíduos de acordo com o fim do estatuto de resíduo da DQR. Não sendo possível reduzir a sua produção ou prepará-los para a reutilização, devem ser adotadas técnicas de gestão, como a reciclagem ou outros tipos de valorização. Estas técnicas têm o poder de diminuir a quantidade de resíduos que são encaminhados para eliminação, seja ela por incineração ou para deposição definitiva em aterros sanitários.

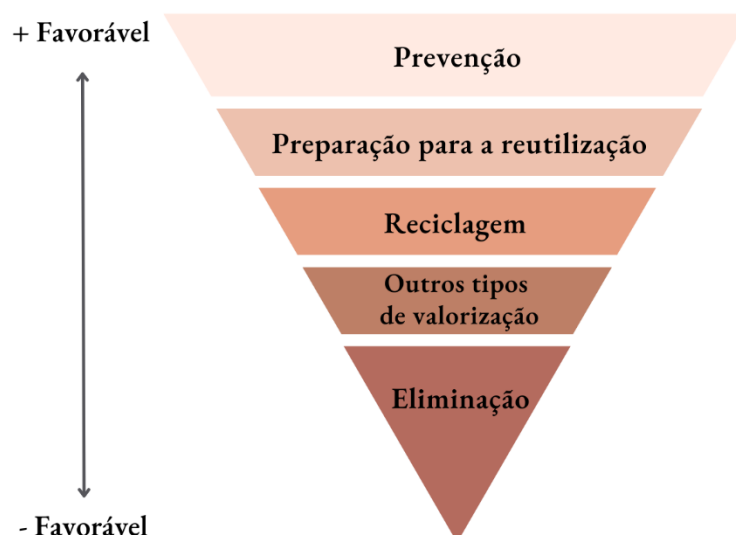


Figura 2.11. Hierarquia dos resíduos (adaptado de Diretiva 2008/98/CE de 19 de novembro)

Em 2015, foi adotado, pela Comissão Europeia, o primeiro Pacote para a Economia Circular com foco na gestão eficiente dos recursos naturais e na correta gestão de resíduos, incentivando a reutilização ou reciclagem, promovendo, assim, o encerramento de um ciclo. Este Pacote contribuiu para o aumento da competitividade global, do crescimento económico e para a geração de novos empregos.

Como mencionado no capítulo 2.1, em 2019, o PEE vem contribuir para a prevenção e mitigação dos impactos ambientais negativos, definindo novos planos de ação para a economia circular, revisão de políticas e diretivas. O PEE incentiva, também, à inovação tecnológica nas indústrias, bem como nas metodologias usadas na gestão de resíduos, e limita a deposição de resíduos em aterro, de acordo com a Diretiva (UE) 2018/850, de 30 de maio.

O novo Plano de Ação para a Economia Circular, adotado pela Comissão Europeia em 2020 no âmbito do PEE, tem como principais objetivos normalizar a produção sustentável e incentivar os consumidores a fazerem compras mais conscientes, tendo em conta a circularidade dos produtos, principalmente nos setores da eletrónica, baterias e veículos, embalagens, plásticos, têxteis e outros que tenham um elevado potencial para a reutilização e/ou reciclagem. Assim, todos os esforços devem ser feitos em prol de uma economia circular.

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro aprova o Regime Geral da Gestão de Resíduos, doravante designado por RGGR, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, transpondo as Diretivas (UE) 2018/849, 2018/850, 2018/851 e 2018/852. Para melhor compreensão do RGGR, é conveniente distinguir resíduo urbano de resíduo não urbano. Os urbanos são todos os resíduos provenientes da recolha indiferenciada ou seletiva de habitações, como o papel e cartão, vidro ou plásticos. Os resíduos não urbanos podem ser definidos

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

como resíduos setoriais que resultam das atividades económicas como, a indústria, hospitais, agricultura, entre outros.

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE), em Portugal, em 2020, foram produzidas cerca de 11,32 milhões de toneladas (Figura 2.12) de resíduos setoriais dos quais, aproximadamente, 9,6 milhões de toneladas foram submetidas a operações de valorização, ou seja, 85,3 % do total.

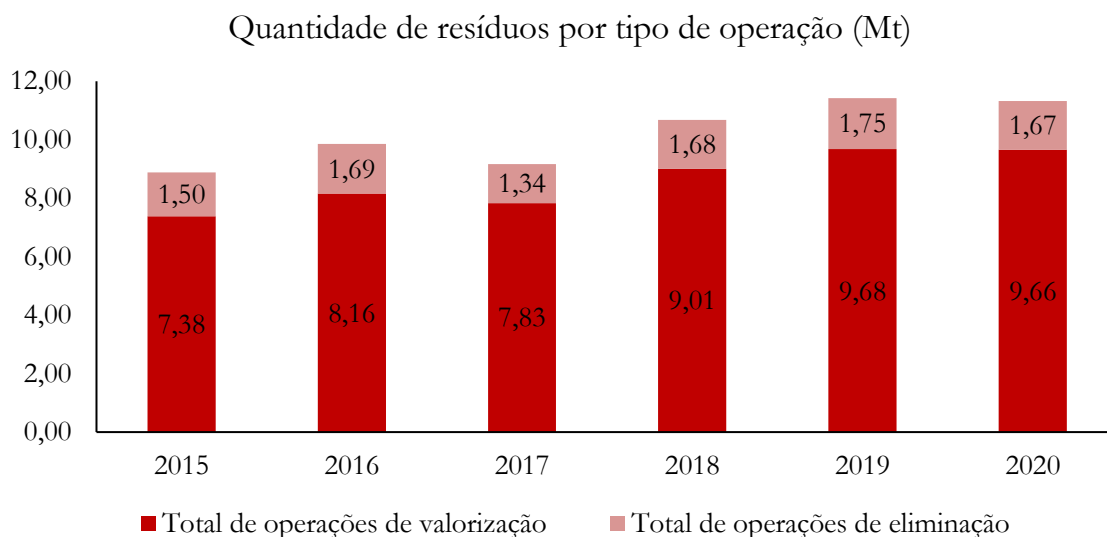


Figura 2.12. Resíduos setoriais por tipo de operação de gestão de resíduos (adaptado de INE, 2022)

Os principais grupos de atividades produtoras de resíduos, em Portugal, são a gestão e valorização de resíduos por inerência à sua atividade e a indústria transformadora que, em 2020, totalizou a produção de 2,9 milhões de toneladas (Figura 2.13). No contexto dos resíduos industriais, importa, também, conhecer a definição de resíduo industrial que, de acordo com o RGGR, se resume aos resíduos resultantes das atividades industriais, bem como aos que resultem das atividades de produção e distribuição de eletricidade, gás e água. Salienta-se ainda que, dentro da indústria transformadora, o setor da fabricação de pasta e papel foi responsável pela geração de, aproximadamente, 630 mil toneladas de resíduos, representando 9% do total acumulado pela indústria transformadora. Os resíduos provenientes deste setor incluem cinzas, *dregs*, *grits*, lamas de cal, entre outros (Simão et al., 2018), explicados com maior detalhe no capítulo 3.

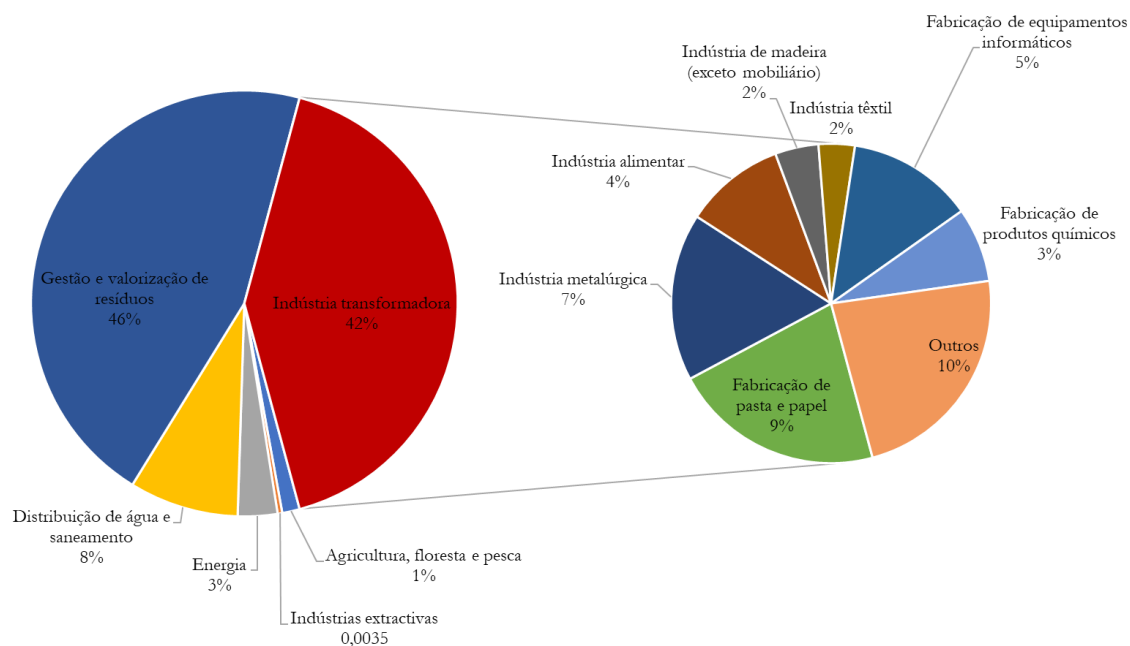


Figura 2.13. Estrutura de resíduos setoriais por principais atividades económicas (adaptado de INE, 2022)

A DQR veio estabelecer a obrigação de os Estados-Membros elaborarem planos de gestão de resíduos que, isoladamente ou articulados entre si, devem abranger todo o território geográfico. Neste sentido, têm vindo a ser elaborados, em Portugal, diversos planos nacionais para cumprir com o disposto desde 1997, ano em que surgiu o primeiro Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU). Nos anos seguintes surgiram, também, os primeiros planos para os resíduos industriais e os resíduos hospitalares sendo, posteriormente, integrados no Plano Nacional de Gestão de Resíduos (PNGR), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 11-C/2015, de 16 de março, para o horizonte 2014-2020.

Em 1999, foi elaborado o primeiro Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais, PESGRI, sujeito a alterações em 2001 e 2002 e aprovado pelo Decreto-Lei n.º 89/2002, de 9 de abril. Este plano tinha como centro de atuação a prevenção da produção de resíduos, promoção e desenvolvimento das opções de reutilização e reciclagem, garantindo a proteção da saúde e do ambiente, a promoção da eliminação do passivo ambiental e ainda a criação de um sistema integrado de tratamento de resíduos industriais «que contemple a inventariação permanente, o acompanhamento e controlo do movimento dos resíduos». No caso dos resíduos perigosos, o PESGRI propôs a construção de centros integrados de recuperação, valorização e eliminação dos mesmos (CIRVER). No contexto do PESGRI foi, também, desenvolvido o Plano Nacional de Prevenção de Resíduos Industriais (PNAPRI), implementado entre 2000 e 2015, que prioriza a redução da quantidade e perigosidade dos resíduos industriais.

O PNGR 2020 (Figura 2.14) foi elaborado dada a necessidade de criação de um instrumento de planeamento macro da política de gestão de resíduos que

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

estabelecesse diretrizes para a correta gestão e prevenção de resíduos e que assegurasse a coerência entre todos os instrumentos anteriormente elaborados.

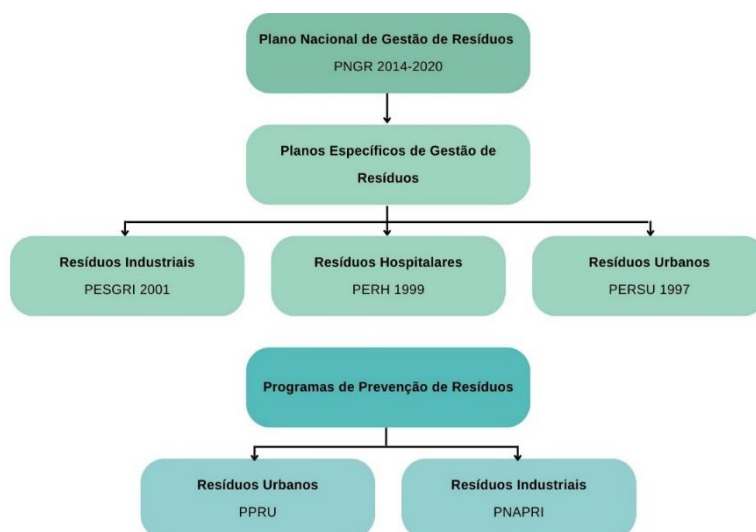


Figura 2.14. Modelo antigo para o planeamento da gestão de resíduos, em Portugal (adaptado de APA, 2021)

Num modelo mais atual, deu-se início, em 2020, à elaboração de novos planos de gestão de resíduos com efeito até 2030 (Figura 2.15).



Figura 2.15. Modelo atual para o planeamento da gestão de resíduos, em Portugal APA, 2021)

O novo PNGR continuará a ser visto como um instrumento de planeamento macro da política de resíduos que enquadra, estrategicamente, dois planos nacionais setoriais de igual horizonte temporal:

- Plano Estratégico para os Resíduos Urbanos (PERSU 2030) que consiste na definição de estratégias e metas específicas para os resíduos urbanos, com responsabilidade particular das autarquias;
- Plano Estratégico para os Resíduos Não Urbanos (PERNU 2030) que vem substituir os planos específicos anteriores e abrange todas as restantes tipologias de resíduos, tais como, os resíduos industriais, hospitalares, agrícolas, entre outros. Adicionalmente, estão refletidas no plano orientações para os fluxos específicos de resíduos que, pela sua natureza e especificidade, são transversais às várias origens ou setores de atividade.

Foca-se no princípio da responsabilidade alargada do produtor e promove várias sinergias na gestão dos resíduos.

O PERNU 2030 apresenta quatro objetivos operacionais no âmbito da redução da produção de resíduos não urbanos, sendo eles:

- “prevenir a produção de resíduos ao nível da quantidade e da perigosidade;
- reduzir os impactes ambientais decorrentes da gestão de resíduos;
- sensibilizar, formar e disseminar, a nível académico e organizacional, em matéria de prevenção e gestão de resíduos;
- aumentar a capacidade de investimento e a despesa em I&D direcionados para a prevenção e gestão de resíduos”

Para atingir os objetivos propostos, o PERNU 2030 estabelece diversas medidas, tais como a elaboração e divulgação de documentação síntese direcionada a setores industriais considerados prioritários, promovendo, também, acordos voluntários entre eles. Considera, ainda, a criação de condições para o crescimento do mercado dos materiais reciclados e dos produtos que os incorporam, incentivando a simbiose industrial entre empresas.

No capítulo seguinte, é explorada a influência que as indústrias podem ter nas cidades, destacando-se a Altri como exemplo.

3 O PAPEL DA INDÚSTRIA DE FIBRAS CELULÓSICAS NA PROMOÇÃO DE CIDADES MAIS SUSTENTÁVEIS

Foi no início do primeiro milénio que, na China, começaram a surgir as primeiras utilizações de papel, palavra derivada de “papyrus”, uma planta originária e abundante no Egito (CEPI, 2022b). Inicialmente, trapos e bambu desfibrado eram utilizados como papel para escrever. Com o decorrer dos anos, o papel demonstrou ter grande utilidade e começaram a ser desenvolvidas tecnologias e a surgir as primeiras fábricas de pasta de papel, embora muito pouco eficientes (CEPI, 2022b).

A procura por papel aumentou exponencialmente por todo o mundo, obrigando o setor a procurar outras matérias-primas disponíveis em abundância na natureza, como é o caso das árvores. Na sua composição, as árvores têm fibras celulósicas que demonstraram um elevado potencial para produzir pasta de papel de forma mais eficiente. No século XIX surgiu, então, a primeira máquina industrial para triturar madeira e foi a partir dessa data que a mesma se tornou a principal matéria-prima para a produção de papel (CEPI, 2022b).

Durante o século XX, os potenciais impactes ambientais da indústria da pasta e papel foram considerados significativos incluindo nas problemáticas relacionadas com o aquecimento global, a ecotoxicidade, a toxicidade humana, a acidificação e a produção de resíduos (Söderholm et al., 2019). Nessa altura, e com o aumento da produção, os possíveis impactes que as práticas florestais podiam causar não eram reconhecidos. Estas práticas contribuíam para a conversão de florestas de elevado valor de conversão e, consecutivo, abate ilegal de árvores, bem como o desenvolvimento irresponsável de plantações (WWF, 2023). Em termos sociais, as práticas florestais insustentáveis contribuíam, igualmente, para a criação de conflitos sociais e de direitos humanos (WWF, 2023). Estas práticas podem, ou não, estar associadas a operações insustentáveis do fabrico de pasta de papel, dado que existem várias indústrias que utilizam a mesma matéria-prima, a madeira.

A constante evolução tecnológica permitiu automatizar todo o processo produtivo, desde a preparação da madeira até à produção de papel, e reduzir a quantidade de recursos materiais necessários ao processo. Não obstante, a contínua investigação permitiu, também, descobrir novas utilizações do papel para revistas, *flyers* ou cupões, papel higiénico, lenços de papel, produtos de higiene feminina, embalagens e outros.

Atualmente, a indústria papelreira é um exemplo de economia circular (Figura 3.1) por reutilizar internamente os seus recursos como, por exemplo, a recirculação da água no processo produtivo. Desta forma, conseguem fechar o ciclo e valorizar os seus resíduos. Para além disso, o setor da pasta e papel consegue aproveitar a biomassa (cascas das árvores, por exemplo) e outros subprodutos para a produção de energia elétrica (BIOND, 2022).

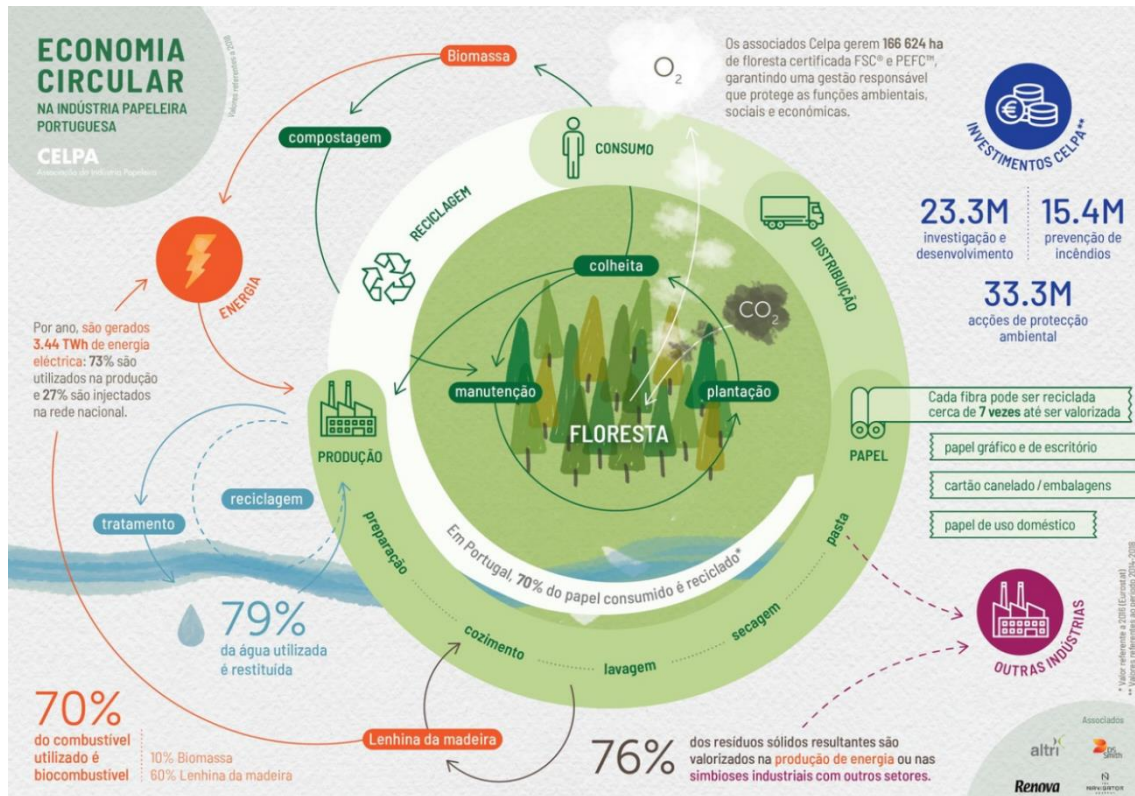


Figura 3.1. Modelo de economia circular no setor da pasta e papel (CELPA, 2020)

Adicionalmente, uma grande variedade de produtos considerados mais sustentáveis têm vindo a ser produzidos. As fibras celulósicas presentes nas árvores servem outras indústrias como a produção de têxteis, cosmética, construção civil ou até na produção de químicos, criando, assim, simbioses industriais (BIOND, 2022).

No âmbito da problemática global associada ao uso de plásticos, a indústria papelera prova ser uma solução mais sustentável devido à biodegradabilidade e reciclabilidade do papel. O plástico, ao contrário do papel, não é biodegradável e decompõem-se lentamente em fragmentos mais pequenos, os microplásticos (Hasson, 2022), entrando na cadeia alimentar dos seres vivos. Adicionalmente, os plásticos de utilização única são, maioritariamente, produzidos com combustíveis fósseis (Wakefield, 2022), causa de impactes significativos no ambiente que contrariam as metas propostas pela União Europeia.

Na Europa, todas as fibras de papel são recicladas até 3,6 vezes por ano (CEPI, 2022c) e, em 2021, 71,4% de todo o papel e cartão consumidos foram reciclados (EPRC, 2022). Já o plástico não pode ser reciclado muitas vezes por degradar a qualidade do produto. Em 2021, das 57,2 Mt de plásticos produzidos na Europa, 87,6% teve como principal matéria-prima os combustíveis fósseis e apenas 10,1% foram provenientes de materiais reciclados (PE, 2022).

A Diretiva (UE) 2019/904, de 5 de junho, relativa à redução do impacto de determinados produtos de plástico no ambiente vem proibir a colocação no mercado de plásticos de uso único considerados desnecessários, tais como

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

cotonetes, talheres, sacos, palhinhas, copos, entre outros. Em Portugal, a Lei n.º 82-D/2014, de 31 de dezembro, determinou o início do pagamento dos sacos de plástico entregue nas caixas das lojas e de supermercados, o que contribuiu para uma redução significativa do seu consumo (PPP, 2021). A Fundação *Ellen MacArthur* desenvolveu uma rede internacional de iniciativas, a *Plastics Pact Network Global*, que procura concretizar a economia circular nos plásticos. Nesse âmbito, Portugal aderiu à iniciativa, em 2020, através da elaboração do Pacto Português para os Plásticos (PPP), no qual foram definidas metas ambiciosas e as respetivas estratégias para a sua concretização. Até 2025, os plásticos de uso único considerados problemáticos devem ser eliminados e 100% das embalagens de plásticos devem ser reutilizáveis, recicláveis ou compostáveis (PPP, 2021). A indústria do papel já demonstrou que os plásticos de utilização têm substitutos à base de fibras celulósicas (Hasson, 2022). No Quadro 3.1, pode observar-se a variedade de produtos obtidos a partir de fibras celulósicas, bem como a percentagem de produção por categoria, a nível europeu.

Quadro 3.1. Produtos da indústria de pasta e papel (adaptado de CEPI, 2022b)

Categoria	Produção
Papel / Embalagens de papel e cartão	59,10%
Caixas Sacos Embalagens	Embrulhos Brinquedos e jogos Exposição de produtos
Papel de jornal, papel de impressão e de escrita	27,70%
Jornais Revistas Livros Brochuras	Catálogos Folhetos Envelopes Cartões de felicitações
Papel para higiene	8,60%
Papel higiénico Lenços de papel Guardanapos	Papel de cozinha Fraldas Pensos higiénicos
Outros	4,60%
Stock de papel de filtro Revestimentos de gesso Isolamentos	Materiais de construção Materiais para telhados Enceramento Asfaltamento
TOTAL	90,6 Mt

No entanto, para satisfazer a crescente procura de papel e de pasta de papel é necessário aumentar o investimento de capital de modo a aumentar a capacidade das unidades industriais. Sendo a matéria-prima proveniente das árvores, a gestão

de florestas de forma sustentável é outro tema que apresenta uma grande relevância para este setor. As empresas devem investir na certificação de gestão de florestas de acordo com os referenciais *Forest Stewardship Council* (FSC) e o *Programme for the Endorsement of Forest Certifications* (PEFC). Desta forma, as empresas conseguem assegurar que a matéria-prima provém de florestas geridas de forma responsável sem contribuir para a desflorestação. Em 2021, em Portugal, 67% da madeira transformada pela indústria papelreira detinha certificação FSC® ou PEFC™ (Biond, 2022).

Na Europa, a indústria papelreira é representada pela CEPI, Confederação Europeia das Indústrias de Papel, sediada na Bélgica. Esta tem como missão garantir a competitividade do setor de pasta e papel junto dos decisores políticos, melhorar a imagem e a visibilidade da indústria do papel, promovendo o exemplo de como a competitividade e a sustentabilidade são indissociáveis (CEPI, n.d.). A CEPI representa cerca de 490 empresas de pasta e papel presentes em 18 países europeus.

De acordo com CEPI (2022), em 2021, existiam 886 fábricas de pasta e papel, em toda a Europa, que produziram, aproximadamente, 37,3 milhões de toneladas de pasta de papel, sendo a Suécia o país com maior produção (Figura 3.2).

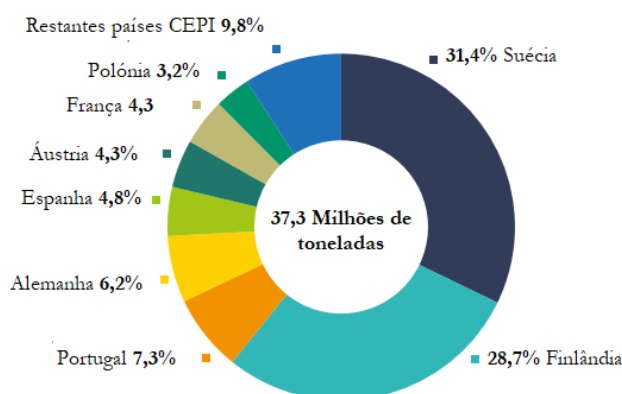


Figura 3.2. Produção de pasta de papel por país (membros CEPI) (adaptado de CEPI, 2022)

Tal como todos os setores de atividade económica, industriais ou não, o setor da pasta e papel tem impactes ambientais em todas as fases do seu ciclo de vida incluindo na recolha de matéria-prima, na produção, na cadeia de valor e no fim de vida. Dado que o tema deste trabalho se foca essencialmente na descoberta de soluções para cidades mais sustentáveis, importa perceber os potenciais impactes ambientais provocados pela indústria papelreira e que soluções já existem para mitigar esses impactes.

O processo produtivo da pasta de papel consiste na preparação das madeiras para os processos químicos que dão origem à pasta. Após a digestão das madeiras para a obtenção das fibras de celulose, a pasta é lavada, peneirada e seca. A partir desta etapa, a pasta está pronta para ser utilizada como matéria-prima ou poderá ainda sofrer um branqueamento. O processo produtivo é explicado com maior detalhe

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

no subcapítulo 3.2, podendo constatar-se que alguns dos impactes ambientais a ter em conta incluem: o consumo de matérias-primas como madeira, água, energia e produtos químicos, as emissões gasosas, efluentes líquidos e produção de resíduos.

De acordo com o Boletim Estatístico de 2021 da Biond (Biond, 2022), Associação das Bioindústrias de Base Florestal em Portugal, a captação total de água foi aproximadamente de 98×10^6 de m^3 , principalmente oriunda de captações superficiais como rios e albufeiras. Relativamente aos efluentes líquidos, estes são tratados antes de serem descarregados no meio recetor. Em 2021, 62% dos efluentes líquidos foram descarregados no oceano, 25% em estuários e 13% em rios e albufeiras. Quando os efluentes são descarregados nos oceanos, as descargas são efetuadas longe da linha de costa garantindo uma eficaz dispersão e, consecutivamente, reduzindo o impacto nos ecossistemas locais.

As emissões gasosas da indústria papelreira, para além das partículas totais, gases acidificantes, como óxidos de enxofre e de azoto e incluem, ainda, as emissões de gases com efeito de estufa (dióxido de carbono, óxido nítrico, metano (Biond, 2022). Os compostos de enxofre são, normalmente, emitidos na presença de condições atmosféricas desfavoráveis e podem provocar odores desagradáveis perto das instalações. As principais fontes de emissão de gases a recuperação de químicos, a produção de óxido de cálcio (cal) para o processo e o uso de combustíveis. Como se pode observar na Figura 3.3, o dióxido de carbono é o GEE emitido em maior quantidade. Apesar do valor de emissões de GEE ser elevado, houve uma redução de 16% face a 2020, sendo que as indústrias papelreiras procuram reduzir, de forma contínua, a sua pegada carbónica através da utilização de energias renováveis e da modernização de processos (Biond, 2022).

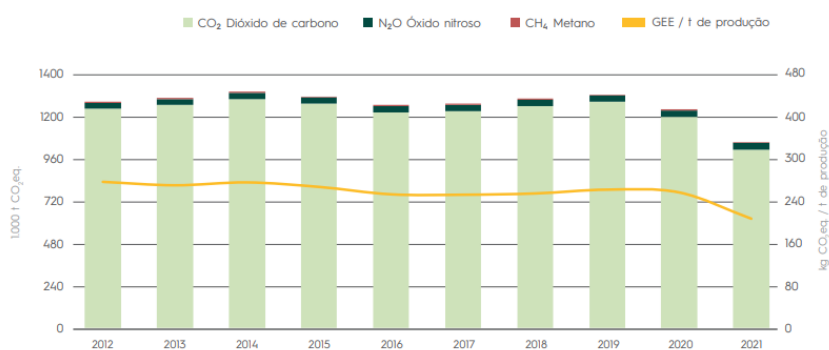


Figura 3.3. Emissões diretas de GEE por tipo de poluente (Biond, 2022)

Os principais resíduos inerentes ao processo produtivo de pasta incluem biomassa proveniente do descasque da madeira, lamas, cinzas, escórias, poeiras e outros resíduos de caldeira, entre outros (Biond, 2022). Para além destes, existem também os resíduos não processuais como plásticos, vidros, papel ou resíduos alimentares que, comparativamente aos resíduos processuais, são em minoria. Em 2021, foram produzidos cerca de 600 mil toneladas de resíduos, sendo as lamas o resíduo

produzido em maioria. No que diz respeito ao destino dos resíduos (Figura 3.4), apenas 26% foram encaminhados para aterro, 31% seguiram para valorização energética, 11% serviram como subprodutos para outras indústrias e os restantes 23%, lamas e cinzas resultantes da queima de biomassa, foram aplicados na agricultura e compostagem.

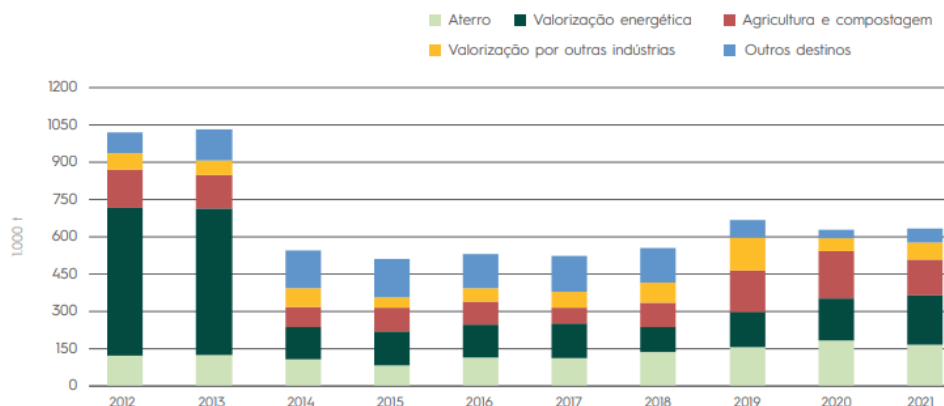


Figura 3.4. Destino dos resíduos produzidos por tipo de operação (Biond, 2022)

Ainda na temática dos resíduos, é relevante procurar soluções para evitar o encaminhamento dos resíduos para aterro. Neste sentido, este trabalho vem contribuir para esse objetivo, através da valorização de resíduos de uma empresa produtora de fibras celulósicas noutras indústrias.

3.1 ALTRI, SGPS e Celbi, S.A. – Caso de estudo

A Altri é um grupo europeu, constituído em 2005, líder na produção de fibras celulósicas e na gestão florestal sustentável, estando cotada na bolsa de valores de Lisboa (*Euronext Lisbon*) onde integra o seu principal índice de referência, o PSI. Na dimensão da produção de fibras celulósicas, a Altri detém 100% de participação de três unidades industriais: Celbi, Caima e Biotek, cuja capacidade de produção é, na totalidade, superior a 1 milhão de toneladas de fibras celulósicas. Na Celbi, situada na Figueira da Foz, e na Biotek, situada em Vila Velha de Ródão, é realizada a produção de fibras celulósicas branqueadas, mais conhecidas como BEKP (*Bleached Eucalyptus Kraft Pulp*) utilizadas, maioritariamente, na produção de papéis para uso doméstico, impressão e escrita, tendo os países europeus como principal mercado para esta matéria-prima. Na Caima, situada em Constância, a produção destina-se às fibras celulósicas solúveis, ou DWP (*Dissolved Wood Pulp*), empregues, maioritariamente, na produção de têxteis, sendo o seu principal mercado a China. Para além das três unidades industriais, a Altri, através da sua subsidiária Altri Florestal, dedica-se à gestão sustentável de mais de 90,4 mil hectares de floresta em Portugal, de acordo com os referenciais FSC e PEFC, e de cerca de 10 mil hectares de área de conservação. Ainda na dimensão florestal, a estratégia da Altri assenta no aproveitamento integral de todos os componentes

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

disponibilizados pela floresta. A nível nacional, a Altri está presente em 163 municípios (Figura 3.5).

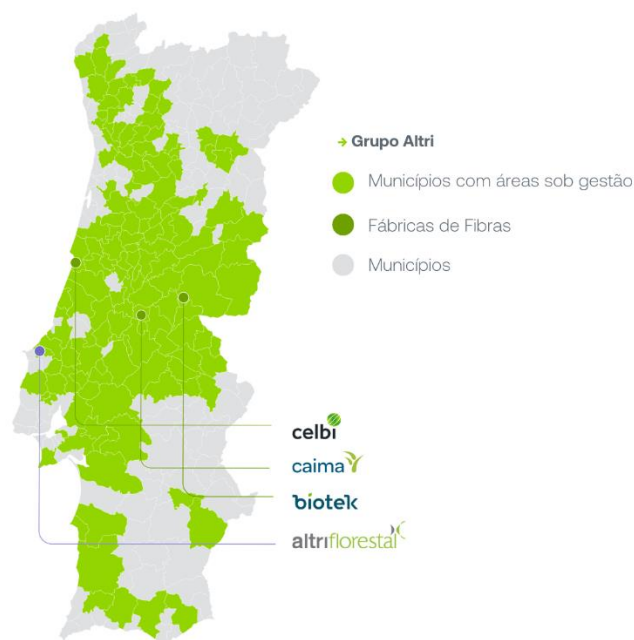


Figura 3.5. Presença do Grupo Altri a nível nacional (Altri, 2023)

Tendo como propósito a construção de um mundo mais renovável e a ambição de ser o produtor mais eficiente à escala global na produção de fibras celulósicas, a Altri definiu a sua estratégia de desenvolvimento assente em 4 eixos que centram a sua atividade e os seus futuros investimentos:

1. Valorizar as pessoas
2. Desenvolver e valorizar a floresta
3. Apostar na excelência e na inovação tecnológica
4. Afirmar a sustentabilidade como fator de competitividade

Como parte integrante da sua estratégia, a Altri reconhece a importância e apoia os dezassete ODS com especial enfoque no 5 (Igualdade de Género), 6 (Água Potável e Saneamento), 7 (Energias Renováveis e Acessíveis), 8 (Trabalho Digno e Crescimento Económico), 12 (Produção e Consumo Sustentáveis), 13 (Ação Climática) e 15 (Proteger a Vida Terrestre), sendo que o seu contributo se reflete no Compromisso 2030 do Grupo (Quadro 3.2). Pretende-se que este Compromisso e o alcance das respetivas metas contribua para aumentar o impacto positivo das operações e produtos da Altri e, consecutivamente, para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis. A redução das emissões de GEE da indústria, a criação de florestas de conservação e *biospots* e a valorização de resíduos impactam diretamente as cidades.

Quadro 3.2. Compromisso 2030 do Grupo Altri (adaptado de Altri, 2023)

ODS	Compromisso	2018 (Ano base)	2022	Grau de cumprimento (2022) ^[1]	Meta 2030
6	Reduzir o uso específico de água (m ³ /tSA) nas unidades industriais da Altri em 50%	20	20	90%	10
6	Reduzir a carga orgânica (CQO, kg O ₂ /tSA) nos efluentes industriais da Altri em 60%	11	11	82%	4
7	100% da energia primária consumida nas unidades industriais da Altri ser de origem renovável	83%	93%	101%	100%
5	Duplicar o número de mulheres em funções de liderança	19	29	110%	38
12	100% dos resíduos processuais valorizados ou reutilizados	77%	64%	111%	100%
13	Reduzir as emissões específicas de GEE de âmbito 1 e 2 (kg CO ₂ /tSA) em 51% ^[2]	163 (2020)	109	89%	65
13	Reduzir as emissões específicas de GEE de âmbito 3 (kg CO ₂ /tSA) em 25% ^[2]	268 (2020)	288	100%	201
15	Aumentar a percentagem do consumo de madeira com certificação de gestão florestal em 40%	57%	70%	100%	80%
15	Duplicar a área sob gestão de conservação natural (ha)	7980	10 167	97%	16 000
15	Desenvolver 13 estações de biodiversidade e <i>biospots</i>	2	7	117%	15
8	Caminhar no sentido de atingir zero acidentes com dias perdidos ^[3]	n.d	34	0%	0

[1] Grau de cumprimento do objetivo em relação às metas definidas para o ano de 2022

[2] Ano base SBT – 2020

[3] Mais do que 3 dias perdidos

A Altri, no âmbito da economia circular, tem em curso vários projetos que materializam os princípios da economia circular.

A Altri, no âmbito da economia circular, tem em curso vários projetos que materializam os princípios da economia circular. Um dos projetos valoriza as lamas biológicas provenientes da ETARi, que são transformadas em composto e reaproveitadas como fertilizante dos solos, enriquecendo-os com matéria orgânica (Altri, 2023). Através da produção de um fertilizante organomineral com as lamas, será substituída uma parte dos adubos químicos de síntese aplicados nas florestas

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

geridas pela Altri (Altri, 2023). Adicionalmente, a Altri produz lamas de carbonato como resíduo, que reincorpora nos fornos de cal e encaminha para outras indústrias para substituir a matéria-prima utilizada como é o caso da sua utilização nem cimento, em revestimento cerâmico, argamassas ou até em alcalinizantes agrícolas (Altri, 2023).



Figura 3.6. Valorização das lamas biológicas provenientes da ETARi (Altri, 2021)

Sendo a principal temática deste estudo a valorização de resíduos através da sua reutilização, o presente estudo foi realizado com resíduos provenientes da Celbi.

3.1.1 Breve enquadramento histórico

A atual Celbi começou a ser construída em 1965 na Leirosa, a 15 km da Figueira da Foz, com a designação Celulose Billerud SARL, após a empresa sueca Billerud AB ter iniciado, em 1962, as suas atividades florestais em Portugal. A Billerud, juntamente com a Companhia União Fabril (CUF), um dos maiores grupos industriais portugueses naquela época, e um grupo de produtores florestais foram os primeiros acionistas da Celbi. Inicialmente, a empresa arrancou com a fabricação de fibras têxteis, em 1968, sendo que, nos primeiros anos de produção, esta decisão foi revista e a unidade fabril foi ajustada para a produção de pasta de papel com uma capacidade de 120 mil toneladas anuais. Em 1970, a empresa passara a designar-se Celulose Beira Industrial, SARL. Uns anos mais tarde, as ações da CUF e dos pequenos acionistas foram transferidas para o Estado Português e, em 1984, parte do capital da Celbi passou a ser detido pelo grupo sueco Stora. Em 1995, o Governo Português vendeu a sua parte ao grupo sueco que passou a deter 100% do capital Celbi, alterando a sua designação para Stora Celbi – Celulose Beira Industrial, SA. Entretanto, as empresas Stora (sueca) e Enso (finlandesa) fundiram-se dando origem a um dos maiores grupos mundiais na área de transformação e comercialização de produtos de origem florestal, o grupo StoraEnso, e a Celbi retoma a sua designação anterior – Celulose Beira Industrial,

SA. Em 2006, a empresa foi integralmente adquirida pelo grupo Altri e, em 2007, foi celebrado um contrato de investimento para o aumento da capacidade de produção de pasta de 300 mil para 550 mil toneladas por ano. Atualmente, a Celbi dedica-se à produção de fibras celulósicas *BEKP* de elevada qualidade a partir de madeira de eucalipto. A Celbi é uma referência mundial por ser considerada um dos produtores mais eficientes da Europa, com uma capacidade de produção anual de cerca de 700 mil toneladas, aplicando e utilizando processos circulares, ecológicos e ambientalmente equilibrados (Celbi, n.d.-a). Desde o início da sua atividade, a Celbi aposta na melhoria contínua e procura garantir as boas práticas no âmbito da qualidade, ambiente e segurança no trabalho, através da estruturação dos processos e atividades, com base nas normas nacionais e internacionais, refletindo-se na certificação e reconhecimento externo. As certificações favorecem o aumento da confiança e credibilidade na gestão tanto para clientes e fornecedores, como para a comunidade em geral. Como tal, a Celbi S.A é detentora das seguintes certificações (Celbi, n.d.-b):

- Sistema de Gestão da Qualidade, ISO 9002, em 1995, transitando para a ISO 9001:2000 em 2004;
- Acreditação do Laboratório, EN 45001, em 1996, transitando para a NP EN/IEC ISO 17025 em 2002;
- Sistema de Gestão Ambiental, ISO 14001, em 1999;
- Registo no EMAS, Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria em 2001;
- Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho, OHSAS 18001, em 2005;
- Certificação energética, ISO 50001, em 2012.

3.2 Processo produtivo de fibras celulósicas branqueadas

Como mencionado em 3.1.1, para a produção da sua matéria-prima através de eucalipto, a Celbi utiliza o processo Kraft (Figura 3.7). Este processo consiste, sinteticamente, no cozimento de aparas de madeira com licor branco, constituído maioritariamente por água, hidróxido de sódio (NaOH) e sulfato de sódio (Na₂S), durante algumas horas, a temperaturas variando entre os 145°C-170°C, num digestor. Durante este processo, os químicos dissolvem a lenhina e os compostos orgânicos, sendo, posteriormente, removidos, restando apenas as fibras celulósicas, mais conhecidas como pasta crua (Haile, 2021). É, então, encaminhada para crivagem para ser submetida a uma lavagem e deslenhificação com oxigénio, seguindo, depois, para a etapa de branqueamento. No final desta fase, a pasta apresenta-se sob a forma de uma suspensão espessa de cor branca, prosseguindo para uma crivagem e depuração finais para seguir para a máquina de secagem. A folha final é cortada em folhas mais pequenas, posteriormente agrupadas em

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

fardos e empilhadas para serem expedidas. Paralelamente ao processo anterior, ocorre a recuperação de químicos, que é de extrema importância para a sustentabilidade do processo, aliado a uma produção de energia.

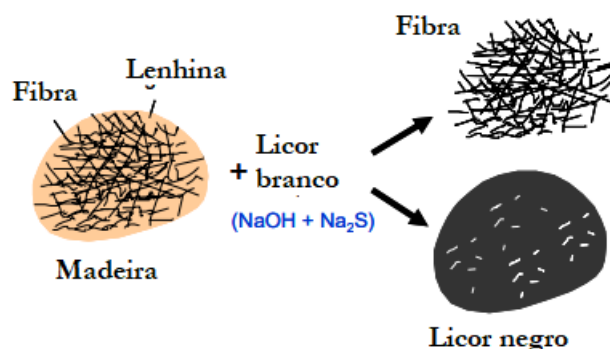


Figura 3.7. Processo de produção Kraft (adaptado de Tran & Vakkilainen, 2007)

O processo *Kraft* é dominante na indústria da pasta de papel sendo produzidas, anualmente, cerca de 130 milhões de toneladas a nível mundial (Fernández-Rodríguez et al., 2019).

A apresentação exaustiva do processo industrial da Celbi, SA, está fora do âmbito do presente documento. Porém, por ser relevante para o enquadramento do trabalho desenvolvido, faz-se uma descrição sumária das principais fases envolvidas no processo (Figura 3.8)

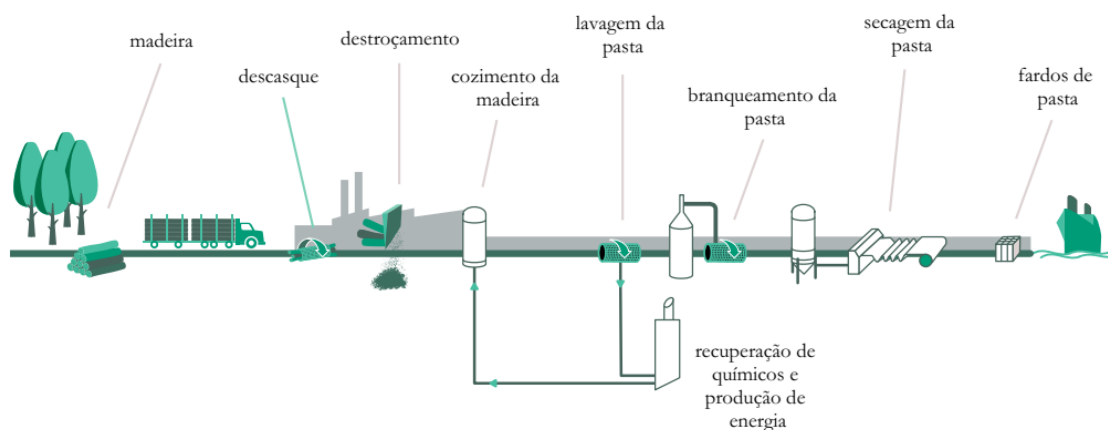


Figura 3.8. Diagrama resumido do processo produtivo de fibras celulósicas (adaptado de Celbi, 2021)

Preparação de madeiras

Numa fase inicial, a matéria-prima chega à receção de madeiras da fábrica na forma de rolaria com casca, sem casca ou na forma de apara. Quando a madeira chega na forma de rolaria com casca é preparada para o resto do processo, ou seja, é descascada e destrocada em aparas, sendo depois armazenada numa pilha exterior. Este destrocamento vai permitir que, na etapa seguinte, a impregnação com o licor branco ocorra de forma eficaz.

As aparas seguem para um processo de crivagem que possibilita a sua divisão em frações: aparas de tamanho maior do que o requerido para um cozimento rentável, que serão novamente destroçadas e reintroduzidas no processo, e as aparas que seguem imediatamente para a próxima etapa: cozimento da madeira.

Deste processo resultam os resíduos do parque de madeiras: a casca e o serrim, sendo que a casca é depois triturada e valorizada energeticamente na caldeira de biomassa e o serrim é incorporado no digestor de material de granulometria fina, juntamente com malcozidos no processo, para um maior aproveitamento de toda a madeira que entra no processo produtivo.

Cozimento da madeira

Antes de serem efetivamente cozinhadas, as aparas devem ser preparadas para o processo de cozimento. Esta preparação consiste na vaporização das aparas para remover o ar e os compostos voláteis que existem no seu interior sendo, de seguida, impregnadas com licor branco que vai, posteriormente, originar a dissolução da lenhina.

Para se dar início ao processo de cozimento, as aparas impregnadas são enviadas para um digestor que, em condições de pressão e temperaturas controladas, vão cozer as aparas e originar a pasta crua, que sai pela base do digestor e é sujeita a uma primeira lavagem antes de seguir para a etapa seguinte.

O subproduto resultante desta etapa é o licor negro fraco que corresponde à junção do licor branco com a matéria orgânica dissolvida e com os reagentes químicos residuais. Este licor é encaminhado para o processo de recuperação de químicos.

Lavagem da pasta

Nesta fase, é feita uma crivagem para remover as partículas indesejadas no processo, como nós ou areias, de modo que apenas prossigam as fibras. A pasta é, seguidamente, lavada e sujeita a uma deslenhificação em reatores de oxigénio, com o objetivo de oxidar parte da lenhina residual ainda presente na pasta e reduzir a sua carga orgânica. Daqui resulta uma pasta com uma cor levemente acastanhada que seguirá para a fase de branqueamento.

Desta fase, resultam os subprodutos da crivagem que são valorizados dentro do processo, no digestor de finos, e contribuem positivamente para a produção de pasta. A Celbi implementou, recentemente, um sistema inovador à escala global que permite o reaproveitamento de material fibroso de granulometria fina desperdiçada no processo de produção e a recuperação dos rejeitos da crivagem (Altri, 2021). Este processo permite a reincorporação no processo produtivo de recursos que, anteriormente, seriam considerados resíduos.

Branqueamento da pasta

A etapa do branqueamento ocorre, resumidamente, em 4 fases distintas de tratamento químico, intercaladas com lavagens em prensas:

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

- 1º estágio: esta fase ocorre em meio ácido com adição de dióxido de cloro;
- 2º estágio: esta fase ocorre em meio alcalino com a adição de peróxido de hidrogénio e oxigénio;
- 3º estágio: esta fase ocorre em meio ácido, sendo adicionado dióxido de cloro em torres de reação;
- 4º estágio: esta fase ocorre em meio alcalino, sendo adicionado peróxido de hidrogénio.

O efluente resultante das lavagens entra no processo de recuperação de químicos.

Secagem da pasta

Imediatamente após o branqueamento, a pasta é encaminhada para a depuração que visa a remoção das partículas de sujidade restantes. É formada uma folha de pasta contínua que entra na máquina de secagem e passa por rolos que a prensam para remover a água, sendo depois submetida ao secador várias vezes fluando entre caixas.

Fardos de pasta

Ao sair da máquina de secagem, a pasta entra na cortadeira para o corte da folha contínua em folhas de 85 x 70 cm, sendo empilhadas em fardos com cerca de 250 kg. Na fase final, os fardos são pesados, embrulhados, carimbados e unificados em conjuntos de oito para seguirem para o controlo de qualidade e, posteriormente, serem expedidos.

Recuperação de químicos

O processo de recuperação de químicos ocorre paralelamente ao processo de produção de pasta e consiste na recuperação do licor negro resultante do cozimento das aparas de madeira e sob a forma diluída, rico em produtos inorgânicos provenientes do licor branco. Este licor, extraído do digestor, é concentrado até se obter um biocombustível espesso, sendo, depois, queimado na caldeira de recuperação para produção de energia elétrica. Os produtos químicos inorgânicos do licor negro são dissolvidos em água formando uma substância rica em carbonato de sódio e sulfureto de sódio, o licor verde. De seguida, é adicionada cal viva ao licor verde, no processo de caustificação, resultando o licor branco constituído por hidróxido de sódio, sulfureto de sódio e carbonato de cálcio.

Os resíduos resultantes deste processo são resíduos inorgânicos constituídos, maioritariamente, por compostos de sódio, enxofre e cálcio e têm as seguintes designações (Rocha, 2018):

- “*Dregs*” ou resíduos do licor verde – resultantes da operação do filtro de resíduos do licor verde.
- “*Grits*” ou resíduos do apagador – resultantes da operação do apagador da caustificação.

- Resíduos de cal – resíduos da cal viva quando esta sofre uma lavagem para eliminação das impurezas, quando necessária por motivos processuais.

Estes resíduos são, atualmente, depositados no aterro controlado de resíduos da Celbi.

Gestão de Resíduos

A gestão de resíduos na Celbi é assegurada pelo Setor de Sistemas de Gestão e através do Sistema de Gestão Ambiental implementado e inclui todas as atividades de caráter técnico, administrativo e financeiro necessárias à recolha, transporte, triagem, tratamento, valorização e eliminação dos resíduos.

Os resíduos produzidos nas instalações da Celbi podem ser associados em grupos atendendo à sua origem, nomeadamente:

- Resíduos urbanos da recolha indiferenciada e seletiva;
- Resíduos processuais resultantes da produção de pasta;
- Resíduos resultantes das atividades auxiliares;
- Resíduos hospitalares no posto médico.

No âmbito do presente trabalho, apenas se aborda, de uma forma mais detalhada, os resíduos resultantes das atividades processuais da Celbi. No Quadro 3.3 e Quadro 3.4, encontra-se um resumo desses resíduos associados aos respetivos destinos. De acordo com o Compromisso 2030 da Altri, mencionado em 3.1, esta tem o objetivo de, até 2030, valorizar ou reutilizar 100% dos seus resíduos processuais. Neste sentido, a Celbi tem vindo a demonstrar uma contribuição ativa para o cumprimento desse objetivo mediante a adoção de medidas internas e externas de valorização. Ainda assim, uma parte dos resíduos processuais tem como destino o aterro controlado. Este trata-se de “uma área impermeabilizada, com pontos de captação de escorrência de lixiviados que são encaminhados para a estação de tratamento de efluentes” (Rocha, 2018).

Quadro 3.3. Resíduos das atividades processuais da Celbi

Resíduo	LER	Origem	Destino
Resíduos de madeira	03 03 01	Parque de madeiras	Reinserção no processo com valorização energética
Resíduos de crivagem	03 03 99	Lavagem e crivagem	
Lamas de cal	03 03 09	Caustificação e forno da cal	Reinserção no processo com redução de desperdício
Cinzas do forno da cal	03 03 09	Forno da cal	Valorização no processo industrial
Lamas secundárias da ETAR	03 03 11	Tratamento de águas e efluentes	Valorização energética
Lamas primárias	03 03 10		

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Quadro 3.4. Continuação do Quadro 3.3.

Resíduo	LER	Origem	Destino
Resíduos da caustificação (<i>dregs</i> e <i>grits</i>)	03 03 02	Caustificação	Envio para aterro interno
Cinzas e escórias	10 01 01	Caldeiras de biomassa	Recolha por entidade externa licenciada para o efeito
Areias de leito fluidizado	10 01 24		

Os *dregs* e as lamas provenientes do tratamento de efluentes representam a maior percentagem dos resíduos gerados; no entanto, a quantidade de *dregs* produzidos tem vindo a aumentar ao longo dos anos, como se pode observar na Figura 3.9, consequência do aumento do volume de produção de fibras celulósicas.

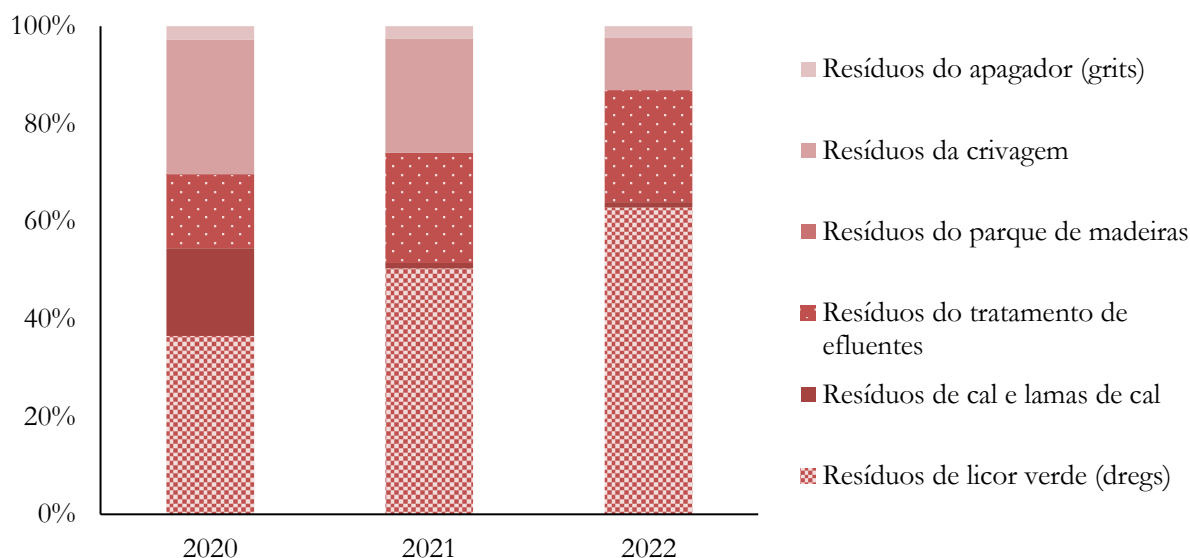


Figura 3.9. Resíduos processuais produzidos na Celbi

Com os regulamentos ambientais cada vez mais exigentes, a Diretiva (UE) 2018/850 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 1999/31/CE relativa à deposição de resíduos em aterros, vem reforçar a importância de reduzir gradualmente, ao mínimo possível, a deposição em aterro de resíduos. A partir de 2030, deverão ser tomadas medidas adequadas para aplicar restrições à deposição em aterro de todos os resíduos adequados para reciclagem, reutilização ou valorização, respeitando a hierarquia dos resíduos (Diretiva (UE) 2018/850, de 30 de maio de 2018). Até 2035, a quantidade de resíduos urbanos depositados em aterros deverá estar limitada a 10% (Diretiva (UE) 2018/850, de 30 de maio de 2018). Desta forma, será possível prevenir potenciais efeitos nocivos na saúde humana e no meio ambiente. Adicionalmente, é assegurado que os materiais constituintes dos resíduos com valor económico são efetivamente valorizados.

O aterro controlado da Celbi representa um problema, estando a ser estudadas novas opções que permitam a valorização destes resíduos, devido ao seu elevado potencial, para serem vistos como uma alternativa às matérias-primas de outras indústrias (Santos, 2019), como é exemplo este trabalho. Com o objetivo de valorizar 100% dos resíduos produzidos vai-se evitar o risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas através de lixiviados e da emissão de odores desagradáveis, inerentes ao encaminhamento de resíduos para aterro (Santos, 2019).

No capítulo 3.2.1, são apresentadas as características físicas e químicas mais relevantes dos *dregs* e os *grits*.

3.2.1 Caracterização dos resíduos da recuperação química

Os resíduos da recuperação química representam a maior fração de resíduos sólidos de todos os resíduos gerados numa fábrica de pasta de papel (Simão, 2018) e são, geralmente, depositados em aterro. De acordo com a Lista Europeia de Resíduos, os resíduos resultantes do processo de caustificação, nomeadamente os *dregs* e *grits* (Figura 3.10) são considerados como resíduos inorgânicos e não perigosos, classificados com o código LER 030302. As características de perigosidade do resíduos são apresentadas no Regulamento (UE) n.º 1357/2014, da Comissão, de 18 de dezembro, que substitui o anexo III da Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho.



Figura 3.10. Resíduos da recuperação química (Altri, 2021)

Os *dregs* são resíduos sólidos industriais inorgânicos removidos do processo da clarificação do licor verde por terem presente na sua constituição elementos não processuais como alumínio (Al), bário (Ba), crómio (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), potássio (K), níquel (Ni) e zinco (Zn), que perturbam as etapas de cozimento, branqueamento e recuperação de químicos (Lopes, 2022; Modolo et al., 2009). Adicionalmente, os *dregs* são ricos em carbonatos de sódio e de cálcio (Na_2CO_3 e CaCO_3), sulfureto de sódio (Na_2S) e uma pequena fração orgânica que não foi totalmente queimada (Modolo et al., 2009). Normalmente apresentam uma humidade entre os 45 % e 60 % e uma massa específica entre 1100 e 1300 kg/m^3 (Lopes, 2022).

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Os *grits* são resíduos inertes e não perigosos, de cor acinzentada, que devem ser removidos do apagador para que a clarificação do licor branco seja o mais eficaz possível. Apresentam na sua constituição uma forte componente de cálcio (Ca), na forma de carbonato de cálcio (CaCO₃), e óxido de cálcio (CaO) (Modolo et al., 2009). Adicionalmente, estão presentes outros elementos como sódio (Na), enxofre (S), fósforo (P), cloreto (Cl), magnésio (Mg), potássio (K), alumínio (Al), ferro (Fe) e silício (Si) (Lopes, 2022; Modolo et al., 2009). Geralmente, apresenta uma secura entre os 85 % e os 95 % e uma massa específica entre 1300 e 1500 kg/m³ (Lopes, 2022).

No presente trabalho, considera-se a caracterização dos *dregs* e *grits* feita por Lopes (2022), que, também, utilizou os resíduos da Celbi e cujo resultados identificaram informações relevantes para este trabalho. Note-se que os *grits* utilizados, neste trabalho, provêm do mesmo lote da autora. Apesar de estes resíduos serem produzidos de forma contínua e diária na Celbi, as suas propriedades químicas podem alterar de lote para lote por diversas variáveis, nomeadamente a quantidade de pasta a produzir, a qualidade da matéria-prima ou a quantidade de produtos químicos inseridos no processo produtivo (Pasandín et al., 2016; Santos et al., 2019).

O Quadro 3.5 apresenta a caracterização dos *dregs* e *grits* da Celbi provenientes de dois lotes diferentes, onde se observa a existência de alguma variedade dos valores parametrizados. Em comparação com os valores-limite para a deposição dos mesmos em aterro para resíduos não perigosos impostos pelo Decreto-Lei n.º102-D/2020 de 10 de dezembro, verifica-se que apenas o teor de carbono orgânico dissolvido excede o limite nos *dregs*.

Quadro 3.5. Caracterização dos *dregs* e *grits* e valores-limite legais de aterros para resíduos não perigosos (adaptado de Lopes, 2022)

Parâmetro	Resíduos do Licor Verde (<i>Dregs</i>)		Resíduos do Apagador (<i>Grits</i>)		Valores-limite em aterro para resíduos não perigosos (DL n.º102-D/2020)
	Lopes (2022)	Colheita da Celbi 10/2022	Lopes (2022)	Colheita da Celbi 10/2022	
pH (a 12,2°C)	11,2	11,4	12,3	11,3	-
Cl, mg/kg	250	320	156	91	50000
SO ₄ , mg/kg	3300	1300	460	740	20000
F, mg/kg	< LQ	2,01	< LQ	1,55	250
Ba, mg/kg	< LQ	<LQ	< LQ	<LQ	100
As, mg/kg	< LQ	<LQ	0,031	0,021	5
Pb, mg/kg	< LQ	<LQ	< LQ	<LQ	10
Cd, mg/kg					2
Cr, mg/kg	0,08	0,07	0,06	<LQ	20
Cu, mg/kg	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	50
Hg, mg/kg					0,5
Ni, mg/kg					10

Quadro 3.6. Continuação do Quadro 3.5. (adaptado de Lopes, 2022)

Parâmetro	Resíduos do Licor Verde (<i>Dregs</i>)		Resíduos do Apagador (<i>Grits</i>)		Valores-limite em aterro para resíduos não perigosos (DL nº102-D/2020)
	Lopes (2022)	Colheita da Celbi 10/2022	Lopes (2022)	Colheita da Celbi 10/2022	
Zn, mg/kg	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	50
Sb, mg/kg	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	10
Se, mg/kg	0,028	0,04	< LQ	< LQ	0,5
COD, mg/kg	2520	2490	430	350	800
COT, mg/kg	36000	47000	< LQ	5900	50000
Óleo mineral (C10-C40), mg/kg	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	999
BTEX, mg/kg					
HAP, mg/kg					100
PCB, mg/kg					50

A necessidade de valorizar os *dregs* e os *grits* de modo a atribuir-lhes um fim sustentável aumenta perante a emergência climática que se vive atualmente. Com os regulamentos europeus a serem cada vez mais exigentes, tendo como um dos focos o encerramento de aterros (Kaza et al., 2018) e o compromisso de ter 100% dos resíduos valorizados, torna-se crucial, para o Grupo Altri, arranjar alternativas para o destino destes resíduos.

A reutilização dos *dregs* e *grits* contribui para a poupança de recursos naturais, para a diminuição da poluição e para a eficiência energética do processo produtivo (Modolo et al., 2010). Algumas das soluções já estudadas na valorização destes resíduos estão resumidas no capítulo 4.

4 VALORIZAÇÃO DE DREGS E GRITS

4.1 Potenciais formas de valorização de *dregs* e *grits*

No capítulo 3.2.1, verificou-se que os *dregs* e os *grits* têm um elevado teor de carbonato de cálcio o que se traduz numa grande vantagem, visto ser uma substância que serve diversos propósitos. O carbonato de cálcio para além de poder ser usado como filler ou pigmento na produção de papel, plásticos, borrachas e tintas, pode, também, ser usado em materiais de construção, em asfaltos ou até na agricultura (Mattila & Zevenhoven, 2014). Esta substância tem propriedades neutralizantes da acidez, tanto nos solos como na água, de controlo da viscosidade, do coeficiente de expansão térmica e o encolhimento do produto (Nguyen, 2021). Por estas razões, o carbonato de cálcio apresenta-se como uma alternativa com potencial para um melhor desempenho e uma redução de custos comparativamente a outros materiais.

Assim, vários têm sido os estudos realizados no âmbito da valorização e reutilização dos *dregs* e dos *grits*, tendo-se verificado um potencial acrescido em dois usos específicos: aplicação de resíduos alcalinos na correção da acidez do solo e a incorporação de resíduos na indústria da construção civil. Para além de um breve resumo dos estudos já existentes, no presente trabalho é destacada a aplicação destes resíduos na pavimentação rodoviária.

Algumas soluções não tão comuns, mas recentes, para a valorização de *dregs* e *grits* passam pela sua aplicação em compósitos de borracha natural para produção de solas de sapatos e chinelos (Bacarin et al., 2020), em coberturas intermédias de aterros sanitários (Farage et al., 2019) e até em barreiras reativas permeáveis para remoção de cobre e sulfatos na drenagem ácida de minas que contaminam tanto as águas subterrâneas como superficiais (Farage et al., 2020). Apesar de estes estudos terem sido realizados, maioritariamente, a uma escala laboratorial, os resultados demonstram que existe um elevado potencial para valorização dos resíduos. Bacarin et al. (2020) avaliou o desempenho dos compósitos com a incorporação de *grits* previamente tratados, em comparação com *grits* não tratados. O pré-tratamento dos resíduos apresentou um maior potencial por ter melhorado as características e propriedades avaliadas dos compósitos, quando comparados com os resíduos não tratados. No geral, os compósitos produzidos demonstraram um aumento de tensão, dureza e um aumento do desgaste por abrasão. Esta aplicação foi estudada, também, a uma escala industrial. O compósito foi processado, cortado e moldado em sola de sapato, demonstrando nunca perder a flexibilidade requerida.

Farage et al. (2019) construíram uma unidade experimental para simulação de um aterro composta por resíduos sólidos e uma cobertura intermédia, composta por 70 % de *dregs* e 30 % de *grits*, em comparação com uma unidade de controlo que continha apenas resíduos sólidos, sem qualquer tipo de cobertura. A avaliação da

qualidade do lixiviado e dos efeitos da atividade microbiológica, da cobertura intermédia de aterro com incorporação de resíduos, permitiram observar que a carência química de oxigénio reduziu perto de 95% após 1 ano e meio de experiência e a concentração de metais encontrava-se abaixo dos limites legais para descarga nos cursos de água. No entanto, a concentração de sódio encontrava-se muito elevada, o que poderá ter provocado a inibição da bioatividade das células e atrasar a degradação da matéria orgânica. Embora a incorporação de *dregs* e *grits* em coberturas intermédias de aterros sanitários se apresente como uma solução possível, é fundamental ter especial atenção na concentração de sódio no lixiviado pelos seus riscos de toxicidade para os organismos.

Relativamente à aplicação destes resíduos em barreiras reativas permeáveis, Farage et al. (2020) apresentaram uma solução de drenagem, semelhante à das minas, para remoção de cobre e sulfatos lá presentes. Apesar de os resultados revelarem uma remoção de 99 % de cobre e a alta porosidade dos resíduos auxiliarem na remoção dos contaminantes, através da difusão entre as partículas, este estudo foi feito numa escala laboratorial. Por isso, é necessário que futuros estudos sejam realizados com uma solução real da drenagem das minas por forma a simular um cenário o mais real possível. Além disso, os custos de manutenção deste sistema são ainda muito elevados (Farage et al., 2020).

Setor agrícola

Outro tipo de aplicações surge no setor agrícola, onde tanto os *dregs* como os *grits* demonstram um bom desempenho como agentes alcalinizantes do solo e como fornecedores de nutrientes ao solo (Simão et al., 2018). Neste âmbito, vários têm sido os estudos feitos, desde a aplicação em cambissolos dístricos (Cabral et al., 2008) a cambissolos húmicos com cultura de trigo (Carlos Medeiros et al., 2009) ou de pinheiros (Pértille et al., 2012). Em solos ácidos, a melhoria da produtividade das diferentes espécies depende, em grande escala, de práticas de gestão de solo adequadas e, portanto, a incorporação de *dregs* e *grits* no solo constituem, em simultâneo, uma alternativa segura em termos ambientais e economicamente viável, em comparação com os métodos tradicionais de correção dos solos, como, por exemplo, a utilização de calcário (Cabral et al., 2008).

Cabral et al. (2008), estudaram o potencial e a eficácia da aplicação destes resíduos como agentes alcalinizantes num cambissolo dístrico, em Setúbal, com um pH ácido e um baixo conteúdo de matéria orgânica. Os *dregs* e *grits* foram previamente sujeitos a uma secagem e crivagem para serem analisadas as suas características químicas e avaliado o seu potencial para neutralização do pH do solo. Na segunda parte do estudo, os resíduos foram adicionados a uma determinada quantidade de solo, em diferentes percentagens, e foi adicionada água destilada conforme necessário para atingir, aproximadamente, 60 % da capacidade de retenção de água no solo. Os preparados foram sujeitos a uma incubação aeróbia durante 18 semanas, a temperatura controlada e, no final deste período, os resultados demonstraram um aumento imediato no pH e depois uma estabilização no decorrer das semanas, bem como um aumento do teor de cálcio (Ca) e redução de

magnésio (Mg), resultando numa melhoria do rácio Ca/Mg. Relativamente à quantidade de sódio e metais, estes não mostraram ser um fator limitativo para a aplicação de *dregs* e *grits* no solo como agentes alcalinizantes.

No Brasil, Carlos Medeiros et al. (2009) avaliou as modificações químicas e físicas de um cambissolo húmico e a resposta de uma cultura de trigo ao aplicar *dregs* como corretivo do solo. Para este estudo, foi aplicado a parcelas de solo de igual dimensão diferentes percentagens de resíduo (25, 50 e 100 %) e fizeram quatro repetições deste ensaio. Metade foi realizada em 2004, não havendo qualquer incorporação do resíduo no solo, e a outra metade em 2006, antes da sementeira direta da cultura de trigo. Na segunda parte do estudo, foram colhidas amostras de solo em diferentes camadas e avaliaram as suas propriedades químicas e físicas. Os *dregs* demonstraram uma melhoria nas propriedades químicas do solo, principalmente na camada superficial, a produtividade da cultura do trigo aumentou e ocorreu uma redução do grau de flocculação. Um estudo muito semelhante em que foi avaliado o efeito residual da aplicação superficial de *dregs* num cambissolo húmico com uma cultura de *Pinus taeda* L., uma espécie do pinheiro, também concluiu que a aplicação de *dregs* em solos ácidos aumenta o pH, reduz o grau de flocculação não afetando as outras propriedades físicas do solo e não foi observada qualquer alteração ao diâmetro dos pinheiros (Pétille et al., 2012). Assim, a aplicação deste resíduo nos solos como agentes alcalinizantes demonstra ser uma alternativa à deposição destes resíduos em aterro e ao uso de produtos agrícolas convencionais.

Setor da construção civil

Na Europa, o setor da construção é responsável por cerca de 50 % dos materiais extraídos da natureza, sendo que, em Portugal, este representa cerca de 90 % dos recursos minerais extraídos (Fonseca et al., 2022). Assim, o setor da construção representa um peso enorme relativamente ao consumo de recursos naturais e é, por isso, crucial encontrar alternativas que respeitem os princípios de economia circular.

Estudos mais recentes apontam para a incorporação de *dregs* e *grits* em diversos materiais de construção, como produtos cerâmicos, argamassas ou até na produção de cimento, sendo estas indústrias já destino de algumas porções de subprodutos da indústria.

As argamassas são constituídas, essencialmente, por cimento, água e areia que é um recurso cada vez mais escasso e a sua extração acarreta possíveis impactos negativos significativos no ambiente (Beiser, 2019; UNEP, 2019). Por forma a contrariar esta tendência, Marques et al. (2014) e Novais et al. (2018) avaliaram a possibilidade de substituir a areia nas argamassas por *dregs* e *grits*. Marques et al. (2014) incorporou uma pequena percentagem, cerca de 10 %, de resíduos como agregado miúdo em argamassas para revestimento de paredes e constatou que pode até provocar uma melhoria na propriedade da argamassa. A mistura apresentou uma maior resistência à compressão axial da argamassa e não

prejudicou a sua consistência, ou seja, nos processos de moldagem não foram necessários aditivos para o facilitar. Novais et al. (2018) apresenta uma conclusão semelhante ao estudar a aplicação de *dregs* como filler em argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes de biomassa (Figura 4.1), visto que a incorporação de *dregs* não alterou significativamente a cinética da geopolimerização e apresentou uma melhor resistência à tração, compressão, bem como uma menor absorção de água em comparação com a argamassa de referência.

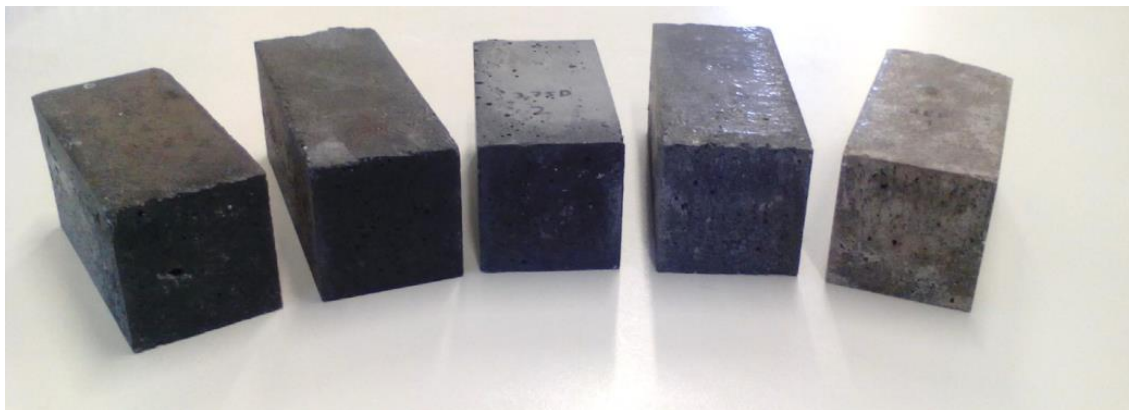


Figura 4.1. Argamassas geopoliméricas com incorporação de *dregs* (Novais et al., 2018)

Na indústria cerâmica, as matérias-primas utilizadas e os aditivos constituintes dos diversos tipos de pasta são, geralmente, areias, argilas, feldspatos, caulinos, calcite, dolomite e talco (Simões, 2017), tendo, por isso, uma grande pegada ambiental no que toca ao consumo de recursos naturais. Como foi mencionado anteriormente, os *dregs* e os *grits* são ricos em carbonato de cálcio e são, por isso, uma excelente alternativa às matérias-primas utilizadas nos produtos cerâmicos.

Santos et al. (2019) procedeu à caracterização química, mineral, física e morfológica dos *dregs* e dos *grits* para estudar a viabilidade da sua incorporação em produtos cerâmicos. Os resíduos analisados demonstraram ter um comportamento muito semelhante ao do carbonato de cálcio, o que comprova o seu potencial de aplicação. Porém, os *dregs*, para além do elevado teor em carbonato de cálcio, apresentaram, também, uma percentagem de contaminantes orgânicos provenientes dos constituintes da madeira como a celulose, lenhina ou carvão ao contrário dos *grits* que revelaram uma maior pureza na sua constituição e apresentam uma temperatura de decomposição similar à matéria-prima convencional usada nos produtos cerâmicos. Neste sentido, a incorporação de *grits* em produtos cerâmicos é preferível. Não obstante, Santos et al. (2019), aponta alguns desafios associados à aplicação destes resíduos em grande escala, uma vez que são resíduos sólidos húmidos. Realizar um pré-tratamento, incluindo moagem e secagem, torna-se necessário para facilitar o seu manuseamento, armazenamento e utilização. Outro desafio sublinhado resulta do facto de as propriedades e características dos resíduos poderem variar de lote para lote e de fábrica para fábrica, o que implica a repetição da caracterização dos mesmos a cada lote recebido. Sijabat et al. (2022) avaliaram a possibilidade de juntar caulino, *dregs* e

grits, em diferentes proporções, na produção de materiais cerâmicos. Para isso, prepararam os resíduos secando-os, triturando-os e peneirando-os para, de seguida, os adicionar à argila branca. Conforme foi observado nos estudos anteriormente mencionados, a partir de uma determinada quantidade de resíduos adicionados coloca-se em causa o comportamento dos resíduos no material resultante, existindo limitações na quantidade de resíduos que poderão ser incorporados. Sijabat *et al.* (2022) concluíram que a incorporação de mais de 20 % de resíduos, incluindo *dregs* e *grits*, aumenta a absorção de água e reduz a resistência mecânica do material cerâmico resultante, não garantindo, assim, as propriedades requeridas para um produto cerâmico semelhante ao convencional, à semelhança de Siqueira & Holanda (2013).

Relativamente ao cimento Portland sabe-se que este é obtido através da mistura de clínquer moído e outros materiais, como o gesso (Gomes et al., 2013). No entanto, é na produção de clínquer que está presente uma diversidade de possíveis impactos ambientais negativos, uma vez que o clínquer é obtido a partir da queima de matérias-primas moídas provenientes da rocha calcária (Varela & Vieira, 2005). Por forma a contribuir para a redução da extração de calcário, Castro et al. (2009) estudou a potencialidade de substituição desse recurso por *dregs* e *grits* e verificou que a incorporação dos resíduos, desde que em pequenas percentagens, na produção de clínquer não afeta negativamente as características do produto resultante, nem produz efeitos negativos no ambiente, nomeadamente nas emissões gasosas e no lixiviado. Uma das vantagens desta solução passa por não se verificar a necessidade de realizar um pré-tratamento aos resíduos para a sua incorporação.

4.2 Incorporação de *grits* em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária

A rede rodoviária é uma das vias de comunicação fundamental para o desenvolvimento global de qualquer país (Modolo, 2006). No entanto, todas as fases do ciclo de vida de uma via rodoviária apresentam possíveis impactos, tanto positivos como negativos, no contexto socioeconómico e ambiental. Entre os impactos positivos, na economia e na sociedade, tem-se a criação de emprego, a ligação entre regiões para a deslocação de pessoas e produtos e a redução dos custos de transporte (Salomão et al., 2019). Porém, a pavimentação rodoviária apresenta diversos impactos significativos no ambiente, nomeadamente na biodiversidade, no solo, no consumo de recursos materiais, entre outros, resumidos no Quadro 4.1 (Araújo, 2016; Salomão et al., 2019; Zoker et al., 2022). Um pavimento rodoviário representa um obstáculo existente entre a precipitação e o solo natural, que acaba por dificultar o reabastecimento das águas subterrâneas e, consecutivamente, afetar o equilíbrio dos sistemas hídricos e ecológicos (Sha et al., 2021). Para além disso, o ruído provocado pelo tráfego perturba tanto os seres humanos como os animais e, no que diz respeito à poluição atmosférica, esta tem

graves consequências, como as chuvas ácidas, a destruição da camada de ozono e até a poluição dos solos e das águas subterrâneas.

Quadro 4.1. Resumo de possíveis impactes ambientais negativos da pavimentação rodoviária

Biodiversidade	Solo	Recursos materiais	Outros
• Interrupção de corredores bióticos • Destruição de habitats • Atropelamento de animais • Remoção de vegetação • Extinção da fauna e flora	• Compactação do solo • Erosão dos solos • Redução da capacidade de infiltração do solo	• Consumo de combustíveis fósseis • Consumo de recursos minerais • Consumo de outras matérias-primas como a água	• Poluição sonora • Contaminação de lençóis freáticos e de cursos de água • Desvio de águas pluviais • Libertação de emissões gasosas para a atmosfera • Produção de resíduos

Além dos impactes ambientais resumidos no Quadro 4.1, importa não esquecer que, sobre estas infraestruturas circulam veículos que, eles próprios, contribuem para impactes ambientais. Na Figura 4.2 estão contempladas as principais fontes dos contaminantes provenientes das estradas que acabam por escoar ou infiltrar-se no solo, causando impactes tanto na qualidade do pavimento como no meio ambiente.

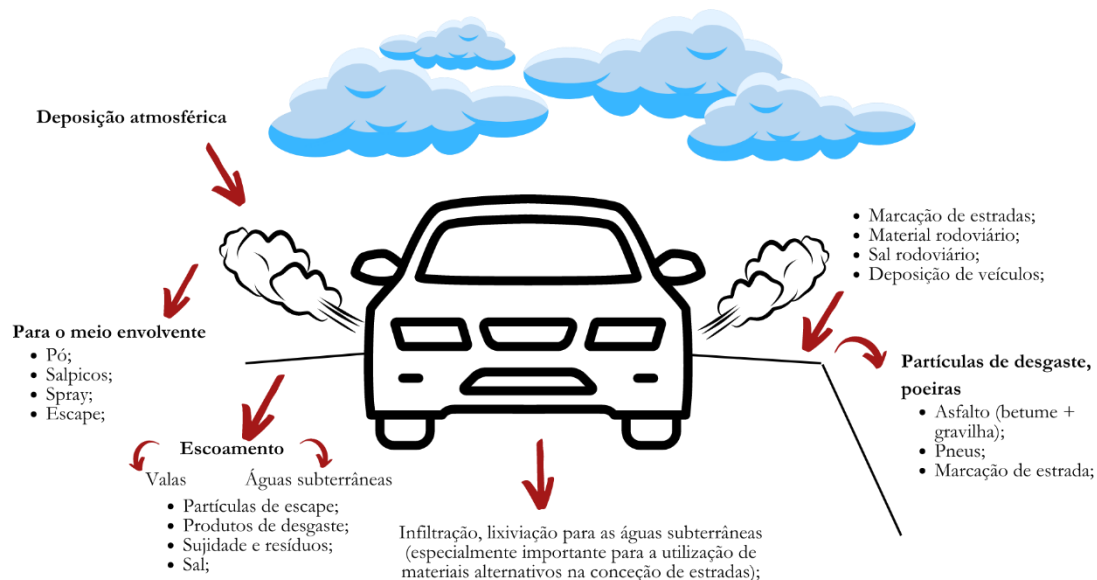


Figura 4.2. Principais fontes de contaminantes das estradas (adaptado de Dawson, 2007)

Sendo a sustentabilidade, no que concerne a perspetiva ambiental, um conceito tão importante nos dias de hoje, estando na Agenda 2030 a promoção de cidades

e comunidades mais sustentáveis (ODS 11) e a produção e consumo sustentáveis (ODS 12), é crucial procurar reduzir os impactos da construção de pavimentos rodoviários no meio ambiente, bem como dos veículos que nelas circulam (UN, 2022b). Neste trabalho, procurou-se encontrar uma solução que contribuísse para a valorização dos resíduos provenientes da indústria e, em simultâneo, para a criação de estradas mais sustentáveis.

Segundo a definição estabelecida na Especificação do LNEC E1 de 1962, entende-se por pavimento rodoviário toda a “parte da estrada, rua ou pista que suporta diretamente o tráfego e (...) pode ser constituído por uma ou mais camadas tendo, no caso geral, uma camada de desgaste e camadas de fundação. Cada uma destas camadas pode ser composta e constituída por camadas elementares”. Destina-se, assim, a permitir a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia.

Um pavimento rodoviário é, então, composto por um conjunto de camadas, todas com diferentes funções e materiais, colocadas sobre uma plataforma de suporte, a fundação do pavimento, como se pode observar na Figura 4.3. Os tipos de materiais utilizados e a espessura de cada uma das camadas irá depender do nível de tráfego e das restantes ações climáticas, bem como da qualidade da fundação (IMT, n.d.-b). Geralmente, nas camadas não ligadas, são utilizados materiais, como solos, agregados naturais ou reciclados, ligantes betuminosos, ligantes hidráulicos e água (Araújo, 2016).

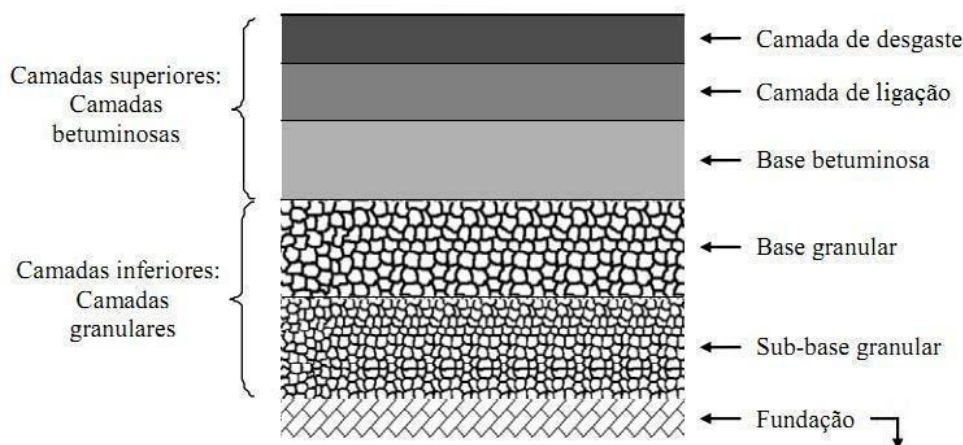


Figura 4.3. Constituição tipo de um pavimento flexível de base granular (Silva, 2006)

A camada que importa no decorrer deste trabalho é a camada de desgaste, AC14 *surf* de acordo com a terminologia preconizada na norma EN 13108-1 (IMT, 2009). É composta por misturas betuminosas que, por sua vez, contêm na sua fórmula materiais granulares aglutinados com ligante betuminoso ao qual ainda pode ser adicionado pó calcário, o filler habitualmente usado. Para além disso, é a camada superficial de um pavimento e é, habitualmente, a camada menos espessa quando comparada às outras. A mistura betuminosa mais usada, em Portugal, para

camadas de desgaste destinadas a estradas é designada por AC14 surf 35/50 (BB) (Dias et al., 2010).

Esta camada, por estar em contacto direto com os pneus dos veículos, é considerada uma das camadas mais exigentes, dado que as misturas betuminosas constituintes devem assegurar uma série de características que garantam a circulação do tráfego com conforto e segurança. São exemplos das características a ter em conta: a estabilidade, a durabilidade, a flexibilidade, a resistência à fadiga, a aderência, a impermeabilidade e a trabalhabilidade (Costa, 2012; IMT, n.d.-b; Modolo, 2006).

A Infraestruturas de Portugal disponibiliza um Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) sobre as características dos materiais para pavimentação por camadas, por tipo de mistura, entre outras (EP, 2014). Respeitando a temática deste trabalho, importa nomear os requisitos dos agregados para as misturas betuminosas para as camadas de desgaste AC14, como referência (Quadro 4.2).

Quadro 4.2. Requisitos das misturas betuminosas para uma camada de desgaste AC14 (adaptado de EP, 2014)

Propriedades		Unidades	
Características Marshall	Nº de pancadas em cada lado da amostra	75	-
	Estabilidade	7,5 a 15	kN
	Deformação	2 a 4	mm
	Quociente Marshal	≥3	kN/mm
Vazios na mistura de agregados (VMA)		≥14	%
Porosidade		3 a 5	%
Índice de Resistência Conservada (IRC)		≥80	%
Resistência à deformação permanente (<i>Wheel Tracking</i>)		A declarar	%
% de ligante		≥4	%
Sensibilidade à água, IITSR		A declarar	%

O material granular, ou agregados, constituintes nas misturas betuminosas, podem ser provenientes de rochas e podem ter origem natural, artificial ou podem ser reciclados. Estes devem cumprir com os requisitos da Norma Europeia EN 13043 – *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas* e, de uma forma geral, ser caracterizados quanto à sua forma geométrica, características físicas e comportamento mecânico (Costa, 2012; IMT, n.d.-a). À semelhança das misturas betuminosas, o CETO disponibiliza também os requisitos dos fusos granulométricos para as misturas betuminosas a aplicar em camadas com características de desgaste (Figura 4.4).

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

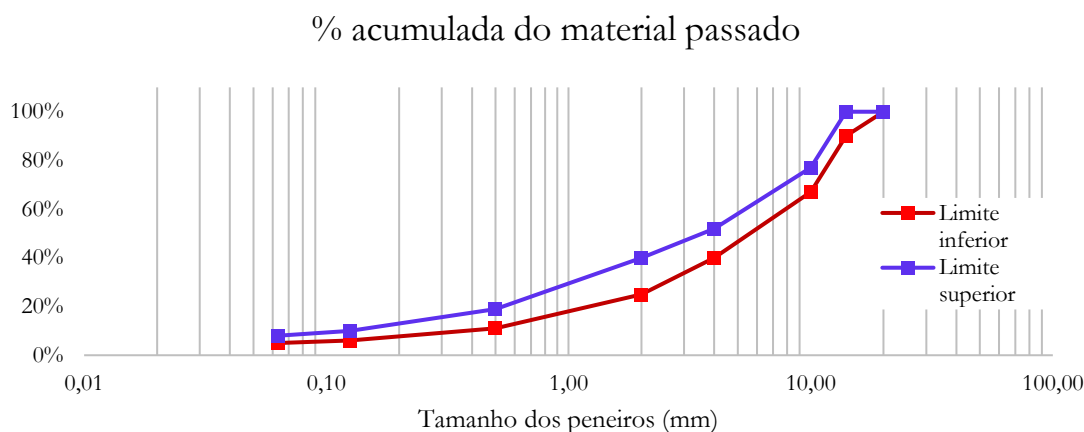


Figura 4.4. Requisitos dos fusos granulométricos para as misturas betuminosas a aplicar em camadas com características de desgaste (adaptado de EP, 2014)

Os requisitos dos agregados para camadas betuminosas com características de desgaste são especificados no Quadro 4.3 de acordo com EP, (2014).

Quadro 4.3. Requisitos dos agregados para camadas betuminosas com características de desgaste (adaptado de EP, 2014)

Requisitos		Unidades	
Qualidade dos finos	3% - 10%	10	g/Kg
	>10%	a)	
Forma do agregado grosso - Índice de achatamento		20	-
% superfícies esmagadas e partidas nos agregados grossos		100/0	%
Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente de Los Angeles		20	%
Resistência ao desgaste por atrito do agregado grosso, coeficiente micro-Deval		15	%
Resistência ao polimento do agregado grosso para camadas de desgaste		50	%
Massa volúmica das partículas		A declarar	Mg/m³
Absorção de água		≤1	%
Baridade		A declarar	Mg/m³
Resistência ao gelo e ao degelo [valor de absorção de água (wa) como ensaio de triagem e valor do sulfato de magnésio (MS)]		Se WA >2, o valor do sulfato de magnésio deve estar enquadrado em MS ₃₅	%
Resistência ao choque térmico		A declarar	%
Afinidade dos agregados grossos aos ligantes betuminosos			-
“Sonnenbrand” do basalto		Perda de massa após a ebulição ≤ 1 e SB _{LA} ≤ 8	%

a) Se a percentagem de passados no peneiro de 0,063 mm for superior a 10 % (em massa), os finos devem cumprir os requisitos aplicáveis aos filleres

Por ocuparem cerca de 75 a 85% do volume das misturas betuminosas (Costa, 2012), a utilização de agregados de origem natural representa uma grande ameaça

ambiental, visto estarem a ser extraídos recursos minerais da natureza, resultando na redução dos mesmos, no aumento dos consumos energéticos e das emissões atmosféricas e noutros impactes associados. Os agregados reciclados surgem como uma alternativa aos agregados naturais e artificiais, sendo provenientes do processamento de materiais inorgânicos utilizados, por exemplo, na construção civil, proporcionando, assim, uma reutilização destes materiais. Estes agregados devem apresentar-se homogêneos, sem qualquer matéria orgânica ou outras substâncias como a madeira ou plástico na sua composição (Costa, 2012; IMT, n.d-a).

Vários estudos têm vindo a ser feitos para avaliar a viabilidade da substituição de agregados naturais por *dregs* e *grits*, resíduos inorgânicos, que demonstram excelentes resultados, principalmente para a incorporação de *grits* em misturas betuminosas.

A contribuição de Modolo et al. (2009) para este estudo divide-se em três fases: caracterização física e química de *grits*, *dregs* convencionais e *dregs* que não continham resíduos de lamas de cal e realização de um ensaio de compressão de Marshall, por forma a determinar o conteúdo ótimo de betume a adicionar à mistura; formulação de misturas betuminosas com incorporação de 1-4% de *dregs* e 5-10% de *grits* e avaliação de propriedades mecânicas; por último, lavagem dos *dregs* para remoção de sais solúveis em excesso e redução da porosidade. De um modo geral, na caracterização química, os resíduos apresentaram valores baixos, não excedendo os limites legais, de componentes indesejados, como o sódio ou outros metais pesados. No entanto, os *grits* apresentaram um maior teor de carbonato de cálcio em relação aos *dregs*, o que representa uma mais-valia para os materiais de construção. Os *dregs*, tanto os convencionais como os que não continham lamas de cal, apresentaram um elevado teor de humidade e de sódio que demonstra uma necessidade extra de lavagem e secagem, traduzindo-se num aumento do consumo energético e do uso da água. Adicionalmente, os *dregs* apresentaram uma maior plasticidade, ao contrário dos *grits*, o que pode causar uma maior absorção de betume e, conseqüentemente, tornar as misturas suscetíveis a alterações volumétricas. As formulações de misturas betuminosas com incorporação de 5-10% de resíduos inorgânicos permitiram verificar que os *grits* têm um melhor comportamento comparativamente aos *dregs* visto que a mistura com *dregs* não cumpre com os parâmetros necessários para garantir a durabilidade, trabalhabilidade e fragilidade, *i.e.* têm menor resistência à deformação, do pavimento rodoviário. Para além disso, as misturas betuminosas com *dregs* são mais porosas e têm uma maior sensibilidade à água devido aos sais solúveis presentes na sua composição tornando esta opção a menos viável. Ainda assim, Modolo et al., (2009) experimentou lavar os *dregs*, agitando-os, com água destilada e aquecida. Este procedimento demonstrou ser crucial para tornar os *dregs* numa potencial opção de valorização, devido às alterações positivas que causou no comportamento dos *dregs* lavados nas misturas betuminosas, sendo que o conteúdo de sais solúveis reduziu, bem como o tamanho das partículas e o

problema da sensibilidade à água ficou resolvido. Posto isto, Modolo et al., (2009) concluiu que os *grits* devem começar a ser estudados a uma escala industrial e os *dregs* podem ser uma opção viável, caso sejam pré-tratados e haja um encaminhamento adequado dos resíduos provocados por este tratamento como os sais e o efluente contaminado. Modolo et al., (2009) sugere que os sais e o efluente entrem novamente no processo produtivo da pasta para serem recuperados e reprocessados, representando assim um valor económico e ambiental.

Pasandín et al., (2016), contrariamente às conclusões de Modolo et al., (2009), teve como objetivo demonstrar que nem todos os fillers minerais são promotores de adesão em misturas betuminosas para asfalto, como é o caso dos *dregs*. Para o comprovar, Pasandín et al., (2016) analisaram as propriedades consideradas mais importantes para fillers, tais como o teor de água, a distribuição e tamanho dos grãos, a morfologia, a composição química e mineralógica, o conteúdo de partículas prejudiciais, entre outras, por forma a avaliar a sua resistência à água. O elevado teor de água presente na constituição dos *dregs* provoca a congregação das suas partículas, o que pode afetar a sensibilidade das misturas à água. Os *dregs* aglomerados podem ser prejudiciais ao dificultarem o revestimento betuminoso, assim como a irregularidade geométrica deste resíduo pode reduzir a resistência da mistura à água. Assim, Pasandín et al. (2016) concluíram que a incorporação de *dregs* em misturas betuminosas a quente ainda não é uma opção segura tanto pela fraca resistência à água, como pela granulometria dos *dregs*, a composição química e pelo aumento da viscosidade da mistura. Para além disso, as propriedades químicas e físicas deste resíduo variam de lote para lote o que se traduz na necessidade de reavaliar estas propriedades sempre que se pretender utilizá-los na incorporação.

No âmbito de um projeto europeu para a economia circular (*Paperchain*) que teve como objetivo avaliar, a uma escala industrial, a viabilidade da incorporação de *dregs* e *grits* num pavimento rodoviário, Paiva et al., (2020) testaram, a uma escala laboratorial, a incorporação de várias percentagens destes resíduos nas misturas betuminosas e avaliou o seu comportamento antes da implementação a nível industrial. Uma mistura betuminosa camada de desgaste AC14 considerada standard é normalmente constituída por betume (35/50) como ligante, calcário e granito britado até 4 mm, agregados grosseiros (4/12 mm e 8/29 mm) e um filler (Paiva et al., 2020). Com estes pressupostos, os autores substituíram o calcário (agregados finos) por 5-10% de *grits* e ainda utilizaram *dregs* e *grits* como substitutos do filler tradicional. Para a utilização dos *dregs* ser possível, foi necessário um pré-tratamento para eliminar a água absorvida por estes e a sua desagregação, como Modolo (2006) demonstrou. As misturas que apresentaram melhor comportamento foram a substituição de filler com 2% de *grits*, a substituição dos agregados finos com 5% de *grits* e, relativamente aos *dregs*, estes apresentaram potencial para o filler (2%), no entanto é importante que estes estejam desagregados, por forma a reduzir a porosidade da mistura. Para a implementação

numa escala industrial, o autor aponta algumas questões a ter em conta como a necessidade de introduzir um gestor de resíduos licenciado no processo por forma a poder transportar e tratar os resíduos, *i.e.* secagem ou trituração dos resíduos, que são essenciais para determinar a distribuição das partículas e a percentagem de incorporação de resíduos na mistura final. Este projeto piloto consistiu na construção de troços de estrada com 250m com as diferentes misturas (Figura 4.5).



Figura 4.5. Pavimentação asfáltica de camada de desgaste com integração dos resíduos *dregs* e *grits* (adaptado de RAIZ, 2020)

Após a implementação, foi necessário proceder a testes de desempenho nomeadamente, à sensibilidade à água, à resistência à deformação, à rigidez e à resistência a fissuras de desgaste. Na sessão final do projeto, os autores reportaram que o tempo de produção das misturas betuminosas com ou sem resíduos foi o mesmo e que, após 1 ano de monitorização, não houve alterações significativas no comportamento do pavimento, representando assim um caso de sucesso (PaperChain, 2021b).

Outro trabalho mais recente foi o estudo realizado por Lopes, (2022) que apresenta resultados muito semelhantes a Modolo et al., (2009). Para a formulação das misturas betuminosas, a autora utilizou os resíduos provenientes da Celbi, apresentada no capítulo 3.1.1 e fez a formulação de acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra – 14.03 Pavimentação, Estradas de Portugal S.A. (Quadro 4.2). Assim, Lopes (2022) determinou os parâmetros mecânicos através do ensaio de compressão de Marshall, os parâmetros volumétricos como a porosidade e baridade, realizou um ensaio de avaliação da sensibilidade à água, um ensaio de *wheel tracking* e ainda analisou a lixiviação das misturas betuminosas, na forma desagregada. De forma resumida e à semelhança dos autores anteriores, os *grits* são os resíduos que apresentaram melhores resultados, mostrando-se promissores quer do ponto de vista das propriedades volumétricas das misturas betuminosas (Quadro 4.4), quer do ponto de vista da resistência mecânica, enquanto os *dregs* necessitam de um pré-tratamento (Modolo et al., 2009; Paiva et al., 2020).

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Quadro 4.4. Resultados da determinação de parâmetros referentes aos agregados e às misturas betuminosas (adaptado de Lopes, 2022)

Propriedades	Resultados (Lopes, 2022)		
	REF	5% <i>Grits</i>	10% <i>Grits</i>
Estabilidade (kN)	14,0	10,0	9,6
Deformação (mm)	4,0	3,5	3,6
Quociente Marshal (kN/mm)	3,5	3,3	2,8
Baridade (kg/m ³)	2400	2272	2262
Porosidade (%)	3,3	6,3	7,0
Sensibilidade à água, ITR (%)	109,3	60,3	75,8

Apesar do elevado potencial dos *grits* para valorização, existem ainda algumas barreiras à implementação efetiva das soluções estudadas anteriormente. A disponibilidade dos agregados e a logística de tratamento e armazenamento são mais complexas em comparação à matéria-prima usual (PaperChain, 2021a). Por outro lado, embora os *grits* estejam classificados como resíduos não perigosos (Decisão 2014/955/UE, da Comissão, de 18 de dezembro), não existe, ainda, um quadro regulamentar específico e harmonizado para a sua utilização em materiais de construção como existe para subprodutos e resíduos de equipamentos elétricos eletrónicos (PaperChain, 2021a). Como mencionado em 3.2.1, os *grits* não são homogêneos de lote para lote. Isto representa uma vantagem, dada a variedade de utilizações possíveis de acordo com as suas características e de forma a responder às necessidades de outras indústrias. Ainda assim, uma das principais barreiras à reutilização de *grits* está relacionada com questões legais nos procedimentos de licenciamento dos resíduos.

Tendo em conta os resultados de Lopes, (2022), a parte experimental deste trabalho prosseguiu com a incorporação apenas de *grits* nas misturas betuminosas, sendo, de seguida, apresentada a sua metodologia e respetivos resultados.

5 INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

A parte experimental deste trabalho teve como principal objetivo testar o potencial de incorporação de *grits* em misturas betuminosas para pavimentos rodoviários através de ensaios laboratoriais de percolação e de escoamento superficial com vista a verificação de possíveis impactes ambientais.

No primeiro ensaio, pretende-se analisar a percolação de água através das lajes e verificar se, consecutivamente, ocorre o transporte de possíveis contaminantes. Com o ensaio de escoamento superficial procura-se, igualmente, forçar o transporte de possíveis contaminantes e analisar o comportamento químico do lixiviado.

Não existem, ainda, diretivas ou regulamentos específicos na UE no domínio da gestão, a nível ambiental, da percolação e do escoamento superficial das águas pluviais em pavimentos rodoviários (Mooselu et al., 2022). Atualmente, a legislação existente foca-se, essencialmente, na qualidade da água baseada no tipo de consumo associado, bem como as massas de água recetoras (Mooselu et al., 2022). Por esta razão, não é possível comparar os resultados da análise ao teor de contaminantes dos ensaios propostos, neste trabalho, a um só documento legal.

Com base na legislação nacional, foi definido um conjunto de documentos legais que podem ser úteis na comparação da qualidade dos lixiviados, deste trabalho, com os valores-limite legais estabelecidos pela legislação (Quadro 5.1). Adicionalmente, é feita uma comparação entre o desempenho das misturas betuminosas com incorporação de *grits* e das misturas betuminosas para perceber, até que ponto, a adição de resíduos da Celbi fornece resultados diferentes de materiais de construção convencionais.

Quadro 5.1. Quadro-legal para comparação dos resultados

Objetivos e âmbito de aplicação	Documento legal
Estabelece os critérios de admissão de resíduos em aterro, bem como os valores -limite de lixiviação para aterros de resíduos não perigosos	Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro (RGGR)
Estabelece normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos	Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto

5.1 Amostragem

Os *grits* utilizados neste trabalho provêm do mesmo lote de resíduos da Celbi utilizados por Lopes, (2022), tendo ficado adequadamente armazenados no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do Departamento de Engenharia Civil do

ISEC. Este aspeto é relevante uma vez que, como mencionado em 3.2.1, as propriedades químicas dos lotes de *grits* podem variar. Por estas razões, não houve a necessidade de se determinar, novamente, os parâmetros mecânicos.

5.2 Formulação de misturas betuminosas com incorporação de resíduos

A percentagem de *grits* a incorporar nas misturas seguiu os estudos inicialmente realizados por Lopes, (2022), justificando-se, assim, a utilização de 5% e 10% de *grits*. Devido à variabilidade própria do processo de fabrico da mistura, optou-se por fazer duas lajes para cada uma das percentagens apresentadas, às quais se juntou uma laje de referência realizada com materiais convencionais, com características semelhantes a camadas de desgaste, usualmente, utilizadas em vias de comunicação rodoviárias. No Quadro 5.2, estão descritas as composições e dosagens de cada grupo de amostras, sendo que, em todas, a percentagem de betume em relação à massa total da mistura foi sempre 5%.

Quadro 5.2. Composição das misturas betuminosas com incorporação de resíduos

Componente	Amostras		
	AC14 surf 35/50 %	AC14 5% <i>Grits</i> %	AC14 10% <i>Grits</i> %
Percentagem em relação à massa total de agregados			
8/20 Gnaisse	15,0	17,0	17,0
4/16 Gnaisse	36,4	35,0	30,0
0/4 Pó calcário	45,6	40,0	40,0
Filler	3,0	3,0	3,0
<i>Grits</i>	0,0	5,0	10,0
Percentagem em relação à massa total de mistura			
Betume	5,0	5,0	5,0

Na Figura 5.1 estão representados os materiais utilizados na formulação da mistura betuminosa excetuando os *grits* que se encontram na Figura 3.10.

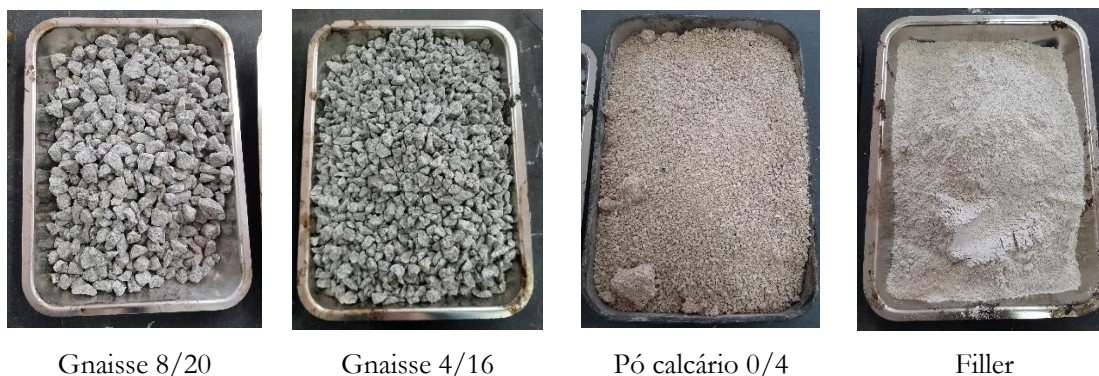


Figura 5.1. Materiais utilizados na formulação de misturas betuminosas, excluindo os *grits*

Para melhor compreensão dos ensaios desenvolvidos e respetivos resultados encontra-se a designação dada a cada laje de pavimento no Quadro 5.3.

Quadro 5.3. Designação de cada amostra

	Designação
Laje de referência AC14 surf 35/50	REF
Amostras com 5% de <i>grits</i>	G1
	G2
Amostras com 10% de <i>grits</i>	G3
	G4

Primeiramente, foram misturados todos os materiais segundo a EN 12697-35 – *Laboratory Mixing* num só tabuleiro no Laboratório de Pavimentos Rodoviários do ISEC. Todos os materiais foram secos e aquecidos em estufa, assim como o betume, a cerca de 150°C. De seguida, derramou-se o betume ao longo de todo o tabuleiro, por forma a serem transferidos para a misturadora elétrica. De seguida, as misturas betuminosas foram encaminhadas para o Laboratório de Pavimentos da Universidade de Coimbra para compactação, segundo a EN 12697-30 – *Specimen preparation by impact compactor* e, posteriormente, cortadas para simular uma laje de pavimento rodoviário com dimensões de 23 cm por 30,5 cm com 4 cm de altura. A Figura 5.2 ilustra as etapas para o fabrico de uma laje de pavimento, desde a dosagem dos materiais constituintes com o betume, à mistura, compactação e corte. Estas etapas foram realizadas para todas as amostras.



Figura 5.2. Etapas para a formação de uma laje de pavimento rodoviário

Após o corte das lajes, é possível verificar a incorporação dos *grits* nas lajes de pavimento como demonstra a Figura 5.3 assinalados a vermelho.



Figura 5.3. *Grits* incorporados em lajes de pavimento rodoviário

Nesta fase preparatória das amostras, foram montadas, em simultâneo, 5 caixas de plástico com malha-sol, uma para cada laje, com o objetivo de suportar as lajes, tendo em conta que cada uma pesava aproximadamente 7 kg, durante os ensaios desenvolvidos e impedir que estas entrassem em contacto com a água ou lixiviados, como se pode observar na Figura 5.4.



Figura 5.4. Caixas para suportar as lajes de pavimento

Após a formulação das lajes de pavimento, deu-se início ao ensaio de determinação da massa volúmica, inserido no Método de Marshall, sendo que os restantes parâmetros não foram determinados por terem sido feitos anteriormente no âmbito do trabalho de Lopes, (2022). Realizaram-se um ensaio de percolação e outro de lixiviação para cada laje de pavimento.

5.3 Determinação da massa volúmica das lajes de pavimento

De acordo com a EN 12697-6:2003, a massa volúmica é a massa por unidade de volume, incluindo os vazios de ar, de uma mistura betuminosa a uma determinada temperatura de ensaio. A determinação da massa volúmica é feita com base na

massa da laje e do seu volume, sendo a massa da laje obtida pela pesagem da laje seca ao ar, existindo 4 métodos de determinação.

Para a determinação da massa volúmica das lajes de pavimentos, utilizou-se o método de superfície saturada seca (SSS) para provetes com uma superfície fechada, que inclui as seguintes etapas:

- Determinação da massa da laje seca (m_1);
- Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w);
- Imersão da laje em banho de água a uma determinada temperatura de ensaio (Figura 5.5). Deixar a água saturar a laje durante um período suficiente até a massa do provete não sofrer alterações (~ 30 minutos);
- Determinação da massa da laje saturada quando imersa (m_2), tomando as precauções necessárias para evitar a aderência de bolhas de ar à superfície da laje;
- Remoção da laje da água, secar as gotas da superfície com uma camurça húmida;
- Determinação da massa da laje saturada com a superfície limpa ao ar, imediatamente após a secagem (m_3).



Figura 5.5. Laje imersa em água para determinação da massa volúmica (SSS)

Após a realização destas etapas, a massa volúmica (SSS) da laje foi calculada da seguinte forma:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

ρ_{bssd} é a massa volúmica SSS (kg/m^3);

m_1 é a massa da laje seca (g);

m_2 é a massa da laje dentro de água (g);

m_3 é a massa da laje seca à superfície saturada (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura do ensaio (0,1 kg/m³).

De seguida, deixaram-se as lajes secarem por completo e deu-se início ao ensaio de percolação.

5.4 Ensaio de percolação através de lajes com vista à verificação de possíveis impactes ambientais

A permeabilidade de um pavimento rodoviário é dos aspetos mais importantes a avaliar na sua conceção, dado que o conteúdo excessivo de água nas diferentes camadas de um pavimento pode causar agitação no solo e provocar uma falha estrutural ou funcional do pavimento como se demonstra na Figura 5.6 (Dawson, 2007; Tiza et al., 2016).



Figura 5.6. Rutura e fissuração de um pavimento degradado com má drenagem (adaptado de Dawson, 2007)

Por isso, as lajes de pavimento rodoviário comuns são, por natureza, muito pouco permeáveis. O principal objetivo da permeabilidade passa por garantir que os fluxos de água são escoados ao longo e através da estrada sem qualquer obstrução no fluxo ao invés de penetrarem no solo através do pavimento. Desta forma, é assegurada a não contaminação do subsolo com poluentes provenientes dos carros, das águas pluviais, entre outros. A percolação é a passagem da água através de pavimentos permeáveis atingindo o subsolo e reservatórios suburbanos e, por isso, está diretamente relacionada com a permeabilidade de um pavimento (Figura 5.7). Esta depende da quantidade de poluição, do grau de adsorção às partículas do solo, da altura do nível das águas subterrâneas e do grau de degradação (Van Bohemen & Van De Laak, 2003).

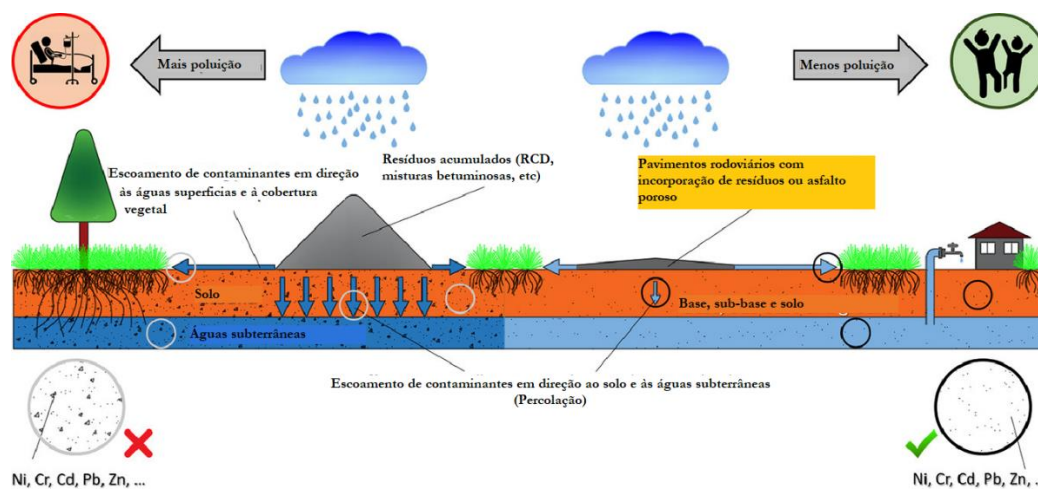


Figura 5.7. Escoamento de contaminantes em direção ao solo e às águas subterrâneas (adaptado de Azadgoleh et al., 2022)

A realização deste ensaio, para além de permitir avaliar a capacidade drenante da laje, é relevante para verificar se a água, ao percolar, arrasta partículas de *grits* e outros contaminantes que possam provocar a contaminação de solos e águas.

Num primeiro momento, envolveram-se as lajes de pavimento em fita adesiva com filamentos (Figura 5.8) para formar uma barreira que impedisse a água de transbordar e de escoar pelas laterais ou cantos da laje. Esta opção não demonstrou ser viável pela facilidade do escoamento da água pelos vazios presentes nas laterais das lajes.



Figura 5.8. Primeira tentativa ao ensaio de percolação

Numa tentativa de impedir que escoasse novamente pelos cantos, as lajes foram seladas com silicone e parafina e envolvidas com um material plastificado rígido. De seguida, verteram-se 500 ml de água destilada por cima de cada laje e aguardou-se até que esta percolasse por completo.

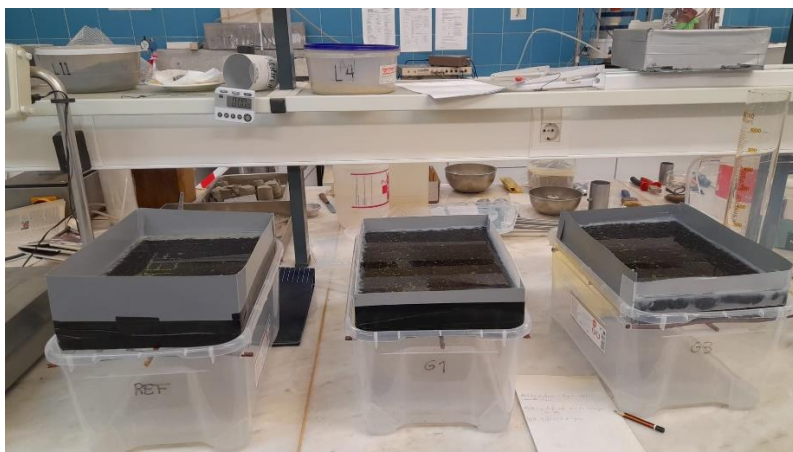


Figura 5.9. Ensaio de percolação

Durante a execução do ensaio verificou-se, novamente, que, devido ao deficiente isolamento lateral, a água escoou pelos cantos (Figura 5.10).



Figura 5.10. Escoamento da água pelos cantos da laje de pavimento

No entanto, a laje não demonstrou ser permeável, dado que a massa das lajes antes e depois do ensaio manteve-se praticamente igual (Quadro 5.4).

Quadro 5.4. Massa das lajes de pavimento antes e depois do ensaio de percolação

Laje	massa da laje (g)	
	Seca	Após ensaio
G1_5%	6654,8	6655,3
G2_5%	6871,4	6877,1
G3_10%	6611,5	6615,6
G4_10%	6799,0	6816,1
Ref	6817,7	6817,9

Com a passagem da água pela laje, é muito provável que esta tenha arrastado partículas dos *grits* que podem contaminar o subsolo. Neste sentido, faz-se uma análise, à água percolada, de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro, em laboratório externo

acreditado, Eurofins Umwelt Ost GmbH, para avaliar a sua toxicidade. O Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro estabelece os valores-limite de lixiviação para aterros e, embora o lixiviado produzido não tenha como destino final o aterro, faz-se uma comparação com os valores estabelecidos para analisar a sua potencial contaminação nos cursos de água através dos parâmetros definidos no RGGR. Não obstante, faz-se, igualmente, uma comparação com os valores-limite de emissão na descarga de águas residuais estipulados pelo Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto.

Os parâmetros a analisar, de acordo com o RGGR, são os presentes no Quadro 5.5, bem como o método de análise utilizado em laboratório externo. Os restantes parâmetros presentes no RGGR como os sólidos dissolvidos totais, óleos minerais, COT, HAP, BTEX e PCB são determinados a partir do resíduo sólido tal-qual, porém, estão fora do âmbito deste trabalho dado que a laje de pavimento rodoviário não será depositada em aterro.

Quadro 5.5. Valores-limite estabelecidos pela legislação nacional

Componentes	DL 102-D/2020, 10 de dezembro VLE mg/kg	DL n.º 236/98, de 1 de agosto VLE mg/l	Método de análise
As	5	1,0	DIN EN ISO 17294-2
Ba	100	-	DIN EN ISO 17294-2
Cd	2	0,2	DIN EN ISO 17294-2
Cr	20	2,0	DIN EN ISO 17294-2
Cu	50	1,0	DIN EN ISO 17294-2
Hg	0,5	0,05	DIN EN ISO 12846
Mo	10	-	DIN EN ISO 17294-2
Ni	10	2,0	DIN EN ISO 17294-2
Pb	10	1,0	DIN EN ISO 17294-2
Sb	0,7	-	DIN EN ISO 17294-2
Se	0,5	-	DIN EN ISO 17294-2
Zn	50	-	DIN EN ISO 17294-2
Cl	50 000	-	DIN EN ISO 10304-1
F	250	-	DIN EN ISO 10304-1
SO ₄	20 000	2000	DIN EN ISO 10304-1
COD	800	-	DIN EN 1484: 1997-08

5.5 Ensaio de escoamento superficial com vista à verificação de possíveis impactes ambientais

Num cenário real, os pavimentos rodoviários estão expostos às mais variadas condições atmosféricas todos os dias, como temperatura, radiação solar, humidade e oxidação (Crucho et al., 2020). Como mencionado no capítulo 4.2, quando ocorre precipitação, as águas pluviais caem nas estradas e transportam consigo os contaminantes até valas, esgotos, rios e até oceanos, principalmente em eventos de maior intensidade. São exemplos destes contaminantes as poeiras, materiais provenientes de veículos como lubrificantes e óleos, abrasão dos pneus, derrames de produtos químicos, vedantes e outros detritos presentes nas estradas (Kriech & Osborn, 2022).

Por estas razões, o lixiviado proveniente das estradas é uma das principais fontes de contaminação do solo e das águas subterrâneas, dado que pode transportar poluentes em forma dissolvida ou suspensa para a berma da estrada (Leitão, 2004). Estes poluentes podem incluir, principalmente, metais pesados como chumbo, zinco, cobre, cádmio e crómio, mas também óleos minerais e hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (HAP) (Van Bohemen & Van De Laak, 2003). Os metais pesados são contaminantes que suscitam grande preocupação devido aos seus efeitos tóxicos em concentrações baixas, tanto para os seres humanos como para outros organismos (FAO & UNEP, 2021). Os contaminantes podem deslocar-se livremente entre compartimentos ambientais, *i.e.* do solo para as plantas e animais, para a atmosfera e até para as massas de água, como as águas subterrâneas, e vice-versa. Quando as concentrações são elevadas, o solo fica poluído, representando, assim, um risco para a saúde pública (FAO & UNEP, 2021).

A quantidade de poluentes presentes nos lixiviados podem variar por uma série de condicionantes: tipo de estrada (autoestrada, estrada nacional, etc.), tipo de pavimento (permeável, impermeável, betuminoso ou asfáltico, etc.) o desgaste da estrada, a intensidade e a duração da precipitação e, geralmente, as primeiras chuvadas após um período de seca descarregam consigo elevadas concentrações de contaminantes, requerendo especial atenção (Van Bohemen & Van De Laak, 2003; Yuan et al., 2017). No entanto, a extensão do impacto difere entre eventos pluviométricos (Yuan et al., 2017). Relativamente ao escoamento superficial, este depende do grau de evaporação, de pulverizações, da formação de poças, do tipo de estrada (inclinação) e, também, do tipo de pavimento utilizado (Van Bohemen & Van De Laak, 2003).

Neste sentido, importa avaliar se a incorporação de *grits* se traduz numa ameaça para o meio ambiente quando comparada com a situação de referência. Posto isto, a execução deste ensaio teve como principal objetivo, através da simulação de uma chuva forte em escala laboratorial, analisar as substâncias do lixiviado escoado nas lajes de pavimento e compará-las com os valores-limite estipulados pelo RGGR e pelo Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto (Quadro 5.5).

Os ensaios de lixiviação são, normalmente, realizados de acordo com a EN 12457-4 - *Characterization of waste - Leaching - Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges*, que vem mencionada no Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro como um dos métodos de amostragem e de ensaio para efeitos de caracterização básica de resíduos. Este método produz informação sobre as características de determinado resíduo, por forma a avaliar se o mesmo pode ser depositado em aterro. Por não ser o pretendido, a utilização da EN 12457-4 não foi uma opção.

Para a preparação do ensaio de lixiviação foi necessário calcular a quantidade de “chuva” a incidir sobre a laje que, de acordo com Ribeiro, (2013) deve ser calculada da seguinte forma:

$$\overline{Pd} = \frac{\overline{Pa}}{DP^*} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$\overline{Pd}$ é a precipitação média diária, em [mm.dia⁻¹];

$\overline{Pa}$ é a precipitação média anual, em [mm.ano⁻¹];

DP^* é o total de dias de precipitação “ativa”, em [dias.ano⁻¹].

$$Pd'_L = \overline{Pd} \times A_L \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

Pd'_L é a quantidade diária de água a aplicar na laje, em [m³.dia⁻¹];

$\overline{Pd}$ é a precipitação média diária calculada na equação 1;

A_L é a área da laje, em m²

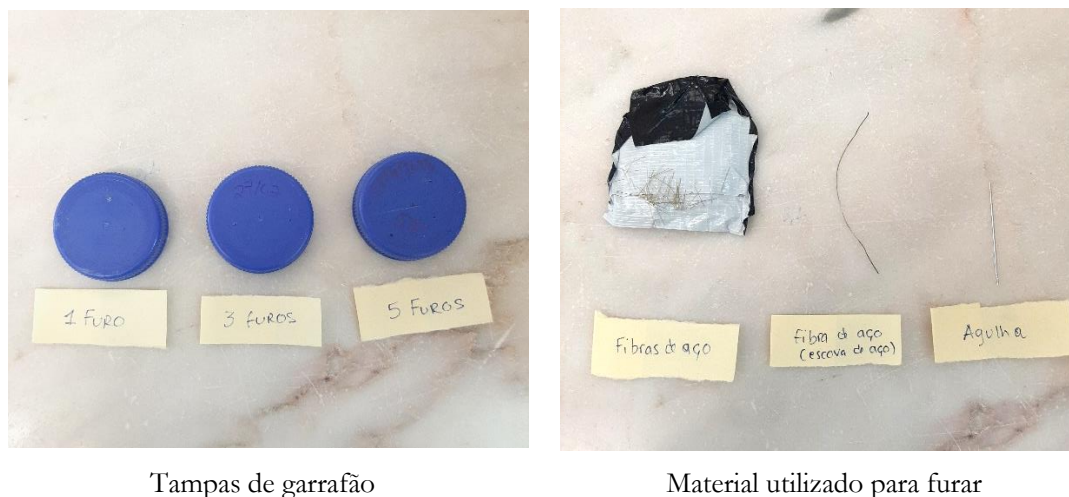
Dado que a quantidade de água a aplicar visa refletir a precipitação média anual da região, optou-se por utilizar a Normal Climatológica da estação de Coimbra/Bencanta (IPMA, 2022a), por ser a mais próxima da Figueira da Foz. Após os cálculos, obteve-se o valor de 880,9 mm/ano (Quadro 5.6). Para a simulação de chuva forte devem ser apenas contabilizados os dias em que a precipitação foi superior a 4 mm/h (IPMA, 2022b). No entanto, com os dados disponíveis na Normal Climatológica, considerou-se os dias em que a precipitação foi superior ou igual a 10 mm. Da aplicação das equações 1 e 2, e considerando os dados no Quadro 5.6, obtém-se um caudal de 1,34 L/dia. Note-se que a área da laje é 0,07 m².

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

Quadro 5.6. Dados relativos à precipitação da estação de Coimbra/Bencanta 1981-2010
Bencanta (adaptado de IPMA, 2022)

	Ano
Precipitação (mm)	880,9
Nº de dias	
P ≥ 1 mm	94,2
P ≥ 10 mm	30,9
P ≥ 20 mm	11,1
P ≥ 30 mm	3,9

Inicialmente, o objetivo era libertar para a laje 1,34L de água destilada durante as 24h seguintes, de forma constante. Contudo, a simulação de caudais tão pequenos demonstrou ser uma dificuldade no decorrer dos ensaios pela inexistência de torneiras ou outras soluções e equipamentos que garantissem o caudal necessário. Foram feitos diversos testes com garrações de água, com várias quantidades de furos com o menor diâmetro possível. Ainda assim, não foi possível garantir que o caudal fosse constante durante as 24h. Observou-se, igualmente, que o volume de água colocado no garrafão, bem como a presença, ou falta, de ar no garrafão demonstraram ser parâmetros com elevada influência para o sucesso dos testes. Quanto maior o volume de água colocado no garrafão, maior era o caudal e, à medida que a água escoava, o garrafão ia perdendo o ar e encolhendo até parar de libertar água. Alguns materiais utilizados no decorrer destes testes encontram-se na Figura 5.11.



Tampas de garrafão

Material utilizado para furar

Figura 5.11. Materiais utilizados nos testes de afinação do caudal

Os testes de afinação de caudal, dada a sua complexidade, colocaram em causa o cumprimento dos prazos para encaminhamento do lixiviado para análise em laboratório externo e, por isso, optou-se por simular o mesmo caudal num período mais pequeno.

Para isso, voltaram a repetir-se os testes, mas com períodos de tempo de 15 minutos a 1 hora, volume de água de 2,5L a 5L e com ou sem furo na base do

garrafão. As etapas para afinar o caudal consistiam em colocar o volume de água pretendido no garrafão de água, virá-lo ao contrário como se fosse um chuveirinho e monitorizar o tempo de escoamento (Figura 5.12). Por fim, calculava-se a diferença entre o volume de água inicial (no garrafão) e o final.



Pesagem da quantidade de água a adicionar



Monitorização do tempo necessário para o escoamento do caudal pretendido

Figura 5.12. Etapas para os testes de afinação de caudal

Após vários testes, a combinação que demonstrou melhores resultados foi a colocação de 2,5L de água destilada num garrafão de 5L com um furo na base, para evitar a falta de ar no garrafão, durante 20 minutos. Para certificar que o caudal era constante, foram feitas 3 repetições com esta combinação (Quadro 5.7).

Quadro 5.7. Testes de afinação de caudal

	Quantidade de água (L)	Água escoada (L)	Duração (min)
Rep. 1 (água da rede)	2,5	1,341	20
Rep. 2 (água da rede)	2,5	1,390	20
Rep. 3 (água destilada)	2,5	1,385	20

Com a afinação do caudal, foi possível avançar para as restantes etapas do ensaio de escoamento superficial. Para isso, e por forma a equiparar o ensaio de lixiviação a um cenário o mais real possível, importa mencionar que a inclinação transversal de uma estrada nacional em linha reta, que tem como propósito a drenagem das águas pluviais, é de 2,5% nos pavimentos betuminosos (IMT, 2010). Assim, para garantir que o ensaio cumpria com este requisito, determinou-se, através da Eq. 4, que a altura do desnível a submeter na laje de pavimento era de 7,6 mm.

$$i = \frac{h}{d} \times 100 \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

i é a inclinação (%)

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

h é a altura do desnível (cm)

d é a distância na horizontal (cm)

Os materiais necessários para a execução do ensaio de lixiviação (Figura 5.13) incluíram a estrutura portante do garrafão de água e da laje de pavimento, rolhas de cortiça para assegurar a inclinação da laje, cronómetro, água destilada, um frasco para recolher a amostra de lixiviado e balança para medir a massa de água que, através do conhecimento da densidade média ($1\text{g}/\text{cm}^3$) permite determinar o volume de água. Importa salientar que todos os materiais utilizados foram limpos antes e depois de cada ensaio para evitar a adulteração dos resultados da análise de cada lixiviado.

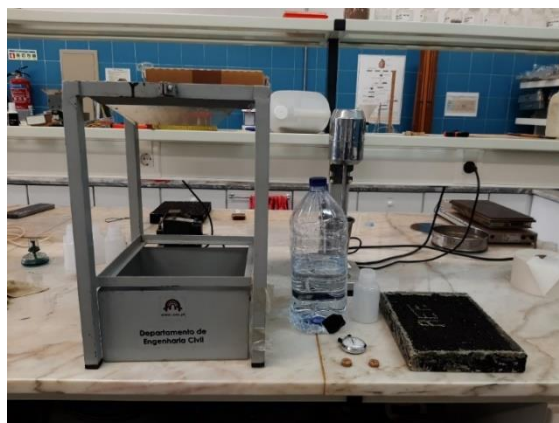


Figura 5.13. Materiais necessários para a execução do ensaio de lixiviação

No que diz respeito às etapas para execução do ensaio, estas são muito semelhantes às etapas realizadas durante os testes de afinação de caudal, diferenciando-se na submissão da laje inclinada à “chuva”, garantindo que esta passava em toda a laje, e na recolha do lixiviado para análise em laboratório externo acreditado (Figura 5.14).



Pesagem da água a adicionar



Inclinação da laje de pavimento



Submissão da laje à “chuva”



“Chuva” a cair na laje

Figura 5.14. Etapas para a execução do ensaio de lixiviação das lajes de pavimentos rodoviários

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1 Determinação da massa volúmica

Para melhor compreender os resultados obtidos, importa mencionar que a massa volúmica de um pavimento rodoviário dito comum é, normalmente, de 2300 kg/m³. Como se pode observar na Figura 6.1, a laje de pavimento com a mistura betuminosa de referência AC14 surf 35/50 aproxima-se deste valor, demonstrando assim bons resultados. No entanto, as lajes de pavimento com incorporação de *grits* demonstraram uma massa volúmica inferior à laje de referência. Estes resultados estão relacionados com a porosidade das misturas, ou seja, as lajes com incorporação de *grits* apresentam maior porosidade em comparação com a laje de referência. Lopes, (2022) apresenta uma porosidade para os *grits* ligeiramente superior ao limite de 5% estipulado pelo CETO (IMT, n.d.-b) o que comprova estes resultados. Ainda assim, as lajes com menor incorporação de resíduos (5%) demonstraram um melhor comportamento em comparação às lajes com 10% (Lopes, (2022)).

Dado que as percentagens de incorporação de resíduos, neste trabalho, foram as mesmas de Lopes, (2022), era esperado que as respetivas lajes demonstrassem um comportamento semelhante ao da autora, o que não se verifica.

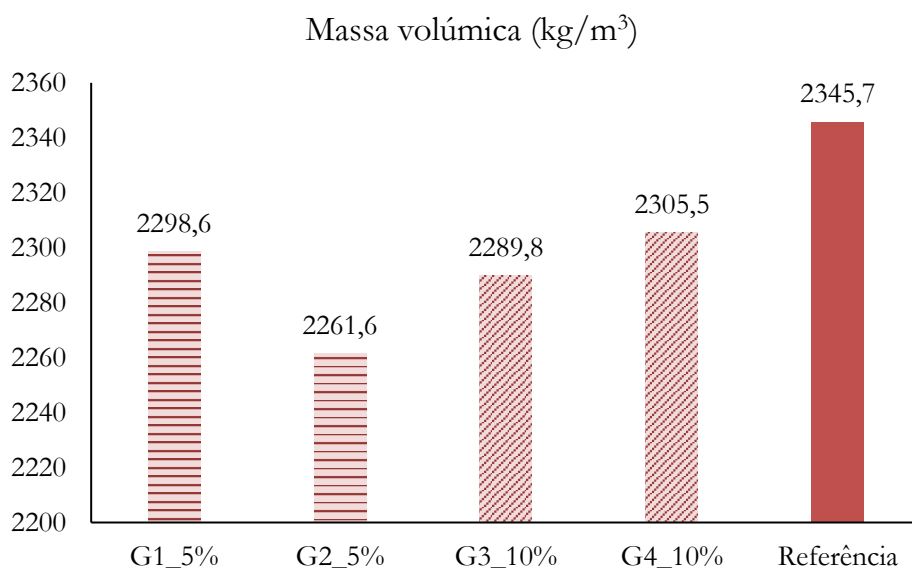


Figura 6.1. Relação da massa volúmica entre as diferentes misturas betuminosas

Por forma a perceber a relação entre a massa volúmica padrão, 2300 kg/m³, e a massa volúmica das restantes lajes, faz-se uma análise à sua variação percentual. Na Figura 6.2, verificou-se que, apesar de a variação máxima, positiva e negativa, ter sido de 2%, houve muita volatilidade nos resultados, *i.e.* tanto aumenta como diminui, não havendo a existência de um padrão. Isto comprova-se pelo facto de

Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção

as lajes que demonstrarem um melhor comportamento, ou uma menor variação percentual em relação ao valor de referência, foram a G1_5% e a G4_10%.

As diferenças nos resultados entre lajes com a mesma percentagem de incorporação de resíduos resultam de problemas de amostragem, daí a importância de fazer várias lajes de repetição.

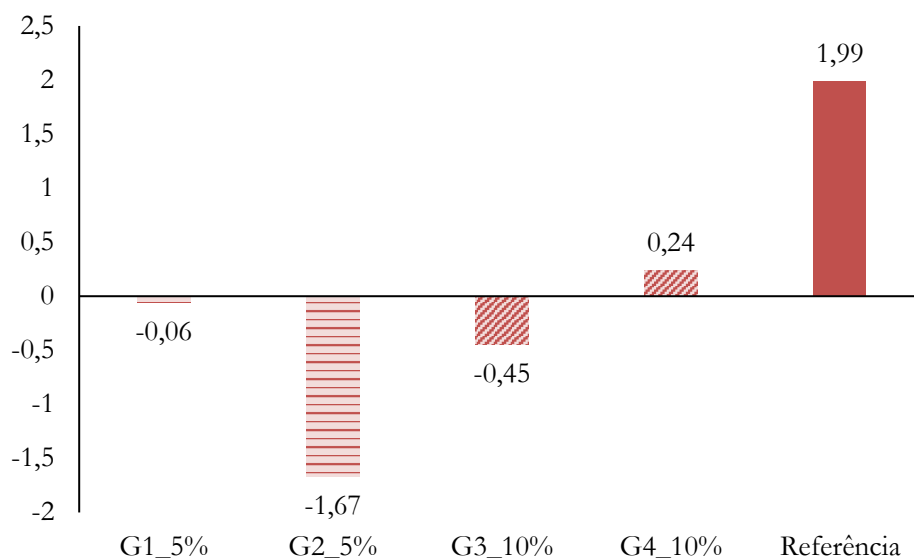


Figura 6.2. Variação percentual da massa volúmica comparativamente a 2300 kg/m³

6.2 Percolação através das lajes de pavimento

Através da passagem da água pelas lajes, verificou-se que houve uma percentagem mínima (<1%) de água absorvida pelas mesmas (Figura 6.3), o que significa que a maior parte da água foi percolada. A laje G4_10% foi a que se encontrava melhor isolada lateralmente, o que não facilitou a percolação da água. No momento da pesagem da laje G4, a mesma tinha ainda alguma água na superfície, ou seja, nem toda a água vertida na laje passou efetivamente pela laje. Ao contrário da G4_10%, a laje G1_5% foi a que menos absorveu água, em comparação à laje de referência, significando, assim, que toda a água percolou pela laje, tornando possível o transporte de maior quantidade de partículas ou possíveis contaminantes.

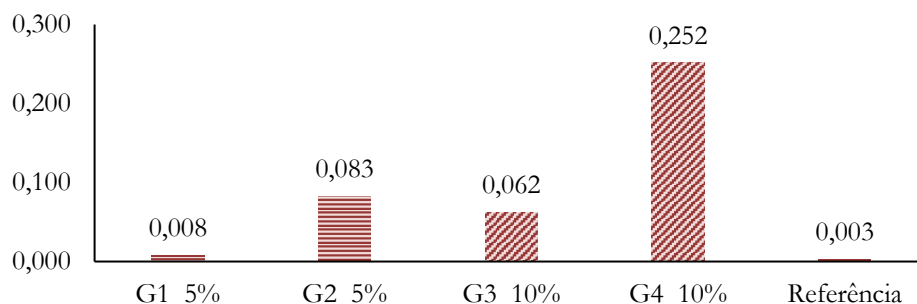


Figura 6.3. Percentagem de água absorvida por cada laje de pavimento rodoviário

Um dos fatores influenciadores da permeabilidade das lajes de pavimento é a porosidade da mistura ou dos agregados. Os *grits* são ricos em carbonato de cálcio que confere alguma porosidade à mistura e, de acordo com os resultados obtidos por Lopes (2022) (Quadro 4.4) estes apresentaram uma porosidade ligeiramente acima do limite (5%). Isto influencia o comportamento das lajes no que toca à permeabilidade. Assim, quanto maior a porosidade maior é a permeabilidade da laje de pavimento. Para aumentar a impermeabilidade de uma mistura betuminosa para pavimentos rodoviários uma das soluções será reduzir a interligação dos vazios e o seu contacto com a superfície do pavimento (Palha, 2008). Uma estrada permeável vai permitir que as águas pluviais entrem no subsolo o que poderá alterar a sua humidade, danificar as restantes camadas do pavimento e, assim, afetar a vida útil da estrada (Leitão, 2004). A utilização de *grits* pode não só contribuir para esta situação como, também, para problemas ambientais, daí a importância de analisar o teor de possíveis contaminantes presentes nos lixiviados.

Os estudos demonstram que a quantidade de contaminantes nas camadas subjacentes ao pavimento rodoviário depende do tipo de solo e da acidez do meio envolvente (Dawson, 2007; Endres et al., 2016; James & Shahin, 1998). Quando a água da chuva apresenta um pH alcalino, os metais pesados são mais facilmente absorvidos pelo solo, no entanto, esse valor vai, também, depender do tipo de tráfego a que o pavimento está sujeito (James & Shahin, 1998). Numa análise laboratorial, é esperado que os valores de metais pesados, principalmente de zinco e chumbo, sejam baixos tendo em conta que ainda não tiveram contacto com pneus e outros materiais dos veículos (James & Shahin, 1998).

A concentração química de cádmio é, geralmente, baixa e a sua concentração nos solos tende a decrescer consoante a distância à estrada (Leitão, 2004). O crómio tem tendência a acumular-se no solo em zonas afastadas da estrada apresentando, por isso, concentrações mais constantes e elevadas (Leitão, 2004). Do estudo realizado por Leitão, (2004) verifica-se que a concentração de Cu ultrapassa o valor de referência (36 mg/kg) nas áreas mais perto das estradas e no primeiro horizonte do solo, contudo estes valores não ultrapassam o valor de intervenção (190 mg/kg) (Leitão, 2004). A presença de chumbo nos solos deve-se à utilização de gasolina com chumbo que, apesar de a sua utilização ter sido proibida, os efeitos no meio ambiente ainda se notam. A sua concentração no solo, frequentemente, ultrapassa o valor limite de referência (85 mg/kg) e verifica-se uma redução da poluição em profundidade e longinquidade (Leitão, 2004). As propriedades do chumbo favorecem a sua acumulação nos níveis mais superficiais do solo o que impede a sua lixiviação para as águas subterrâneas (Leitão, 2004).

Os cloretos constituem os sais utilizados como agente de degelo no inverno (Leitão, 2004). À medida que o lixiviado escorre para as camadas subjacentes, o cloreto tem uma tendência para precipitar e se difundir na água o que provoca um aumento da sua concentração no escoamento (James & Shahin, 1998). No entanto, em Portugal, este problema não é relevante devido à baixa utilização de sais de degelo (Leitão, 2004).

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

A caracterização química dos *grits* (Quadro 3.5) realizada por Lopes, (2022) demonstrou que nenhum dos parâmetros analisados ultrapassou o limite estipulado pela legislação, incluindo os metais pesados. Isto significa que os *grits* não são considerados perigosos e espera-se que, ao ser incorporado nos pavimentos rodoviários ou outros materiais, o mesmo comportamento se mantenha quando o lixiviado percolar para as camadas abaixo. Desta forma, não prejudica o solo nem as águas subterrâneas.

De acordo com estudos já feitos, a aplicação de *grits* no solo não demonstrou afetar negativamente a quantidade de metais pesados, apresentando, inclusive, valores abaixo do limite estipulado pela legislação (Cabral et al., 2008; Nurmesniemi et al., 2010). Comparativamente aos valores de referência para o solo disponibilizados pela APA, (2022) verifica-se que o teor de contaminantes presentes no solo após o contacto com *grits* mantém-se abaixo do limite estipulado para uso urbano (Quadro 6.1).

Quadro 6.1. Teor de contaminantes no solo após contacto com *grits* e comparação com valores de referência

	Cabral et al., 2008 (mg/kg peso seco)	Nurmesniemi et al., 2010 (mg/kg peso seco)	APA, 2022 (mg/kg peso seco)
Cu	6,25	<10	140
Zn	98,4	9,9	340
Pb	23,6	>3	120
Ni	3,0	23,9	100
Cd	0,23	0,3	1,2
Cr	11	12,6	160
As	-	<3	18
Ba	-	228,7	390
Hg	-	<0,03	0,27
Mo	-	<1	6,9
Sb	-	<4	7,5

Importa, também, lembrar que os *grits* têm um pH elevado (~12), o que lhes confere um comportamento alcalinizante no solo (Cabral et al., 2008; Lopes, 2022). O carbonato de cálcio proveniente dos *grits* pode até ser uma vantagem para solos ácidos, tendo em conta que por ter um pH elevado (~12) produz compostos metálicos e precipitados menos ácidos (James & Shahin, 1998).

Dos resultados obtidos da análise à água percolada através das lajes de pavimento (Quadro 6.2) verifica-se que, para a maioria dos elementos, nomeadamente antimónio, arsénio, chumbo, cádmio, crómio, mercúrio, selénio e cloro, os valores foram inferiores ou iguais ao limite de quantificação (LQ) em todas as lajes de pavimento. Para os elementos restantes, de uma forma geral, o teor de contaminantes é inferior aos valores-limite de emissão estipulados pelo Decreto-Lei n.º 236/98, 1 de agosto relativo à descarga de águas residuais e pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro. Para ser possível a comparação com o Decreto-Lei n.º 102-D/2020 de 10 de dezembro, fez-se a conversão das unidades

de medida estipuladas (mg/kg) em mg/l, assumindo-se a densidade média da água de 1g/cm³ (1l de água destilada equivale a, aproximadamente, 1kg). Estes resultados vêm comprovar que a incorporação de *grits* em lajes de pavimento, em comparação à laje de referência, tem um elevado potencial, como se prevê na revisão bibliográfica (Cabral et al., 2008; Lopes, 2022). Relativamente às lajes G1 e G2, estas apresentam um comportamento semelhante em todos os contaminantes, à exceção do teor de níquel. Na laje G1, o teor de níquel é inferior e na laje G2 é superior, em relação à laje de referência. Verifica-se, de uma forma geral, uma redução do teor de contaminantes ao incorporar 5% de *grits* nas lajes de pavimento. As lajes G3 e G4 apresentam um comportamento inverso ao verificar-se que o teor da maioria dos contaminantes aumentou, em comparação à laje de referência. Não obstante, a laje G3 apresenta uma redução do teor de bário e de zinco, ao contrário da laje G4.

Quadro 6.2. Resultados obtidos da análise à água percolada através das lajes de pavimento

	REF mg/l	G1 mg/l	G2 mg/l	G3 mg/l	G4 mg/l	DL n.º 236/98, 1 de agosto VLE mg/l	DL 102- D/2020, 10 de dezembro VLE mg/l
Sb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,7
As	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	1,0	5,0
Ba	0,0016	0,0008	0,0006	0,0009	0,0023	-	100
Pb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,0	10
Cd	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,2	2,0
Cr	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,001	2,0	20
Cu	<0,001	0,003	0,001	0,003	0,192	1,0	50
Mo	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	-	10
Ni	0,002	<0,001	0,009	<0,001	<0,001	2,0	10
Hg	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,05	0,5
Se	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,5
Zn	0,028	0,016	0,007	0,015	0,069	-	50
COD	7	5,3	7	7,7	20	-	800
Cl	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	1,0	50 000
F	1,1	<1	<1	1,4	2,6		250
SO ₄	3,5	11	4,9	24	41	2000	20 000

Para uma melhor perceção dos resultados, fez-se a média e o desvio padrão dos valores para cada grupo de lajes de pavimento com a mesma percentagem de *grits*, por forma a ter em consideração possíveis erros de amostragem (Quadro 6.3). Para além disso, os resultados obtidos para alguns contaminantes foram, maioritariamente, inferiores ao limite de quantificação (LQ), impossibilitando a descrição do valor exato. Assim, assume-se o valor associado ao limite de quantificação para cada um dos respetivos elementos, como, por exemplo, o teor de molibdénio que é inferior a 0,001 (LQ), facilitando a comparação entre as diferentes lajes. Importa, também referir que, no Quadro 6.3, estão apenas

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

refletidos os contaminantes que, efetivamente, apresentam variações no teor entre as diferentes lajes. Apesar de existir alguma dispersão dos valores, principalmente para o teor de sulfatos que apresenta um desvio padrão de 12 mg/l, nenhum deles excede os valores-limite existentes.

Quadro 6.3. Média e desvio padrão do teor de contaminantes de cada grupo de lajes de pavimento com incorporação de *grits*

	REF mg/l	5% <i>Grits</i> mg/l	Desvio padrão (5%)	10% <i>Grits</i> mg/l	Desvio padrão (10%)
Ba	0,0016	0,0007	0,0001	0,0016	0,0010
Cu	0,001	0,002	0,0014	0,0975	0,1336
Mo	0,001	0,001	-	0,0015	0,0007
Ni	0,002	0,005	0,0057	0,001	-
Zn	0,028	0,0115	0,0064	0,042	0,0382
COD	7	6,15	1,2021	13,85	8,6974
F	1,1	1	-	2	0,8485
SO ₄	3,5	7,95	4,3134	32,5	12,0208

Numa análise mais detalhada, as lajes de pavimento com incorporação de *grits* demonstram algumas diferenças no teor de contaminantes, quando comparadas à laje de pavimento de referência, como se pode observar no Quadro 6.4. As variações absolutas observadas, tanto positivas como negativas, nos elementos bário, molibdénio, níquel, zinco e cobre foram pouco significantes (<0,1mg/l). O teor de molibdénio aumentou perante a incorporação de 10% de *grits*, assim como o teor de zinco, cobre, flúor, carbono orgânico dissolvido e sulfatos. Por sua vez, o teor de zinco sofreu uma redução e o teor de bário não se alterou. As lajes com incorporação de 5% de *grits* demonstraram uma redução no teor de bário, zinco, flúor e carbono dissolvido e um ligeiro aumento no teor de níquel, cobre e sulfatos.

Quadro 6.4. Variação absoluta do teor de contaminantes presentes na água percolada pelas lajes de pavimento com incorporação de *grits*, em relação à laje de referência

	5% <i>Grits</i> (G1 e G2) mg/l	10% <i>Grits</i> (G3 e G4) mg/l
Ba	-0,0009	0
Mo	0	0,0010
Ni	0,0070	-0,0010
Zn	-0,0165	0,0560
Cu	0,0010	0,0965
F	-0,1000	0,9000
COD	-0,8500	6,8500
SO ₄	4,4500	29,0000

Os três elementos que demonstram uma maior variação e, consecutivamente, maior influência na qualidade do lixiviado são o flúor, o carbono orgânico dissolvido e sulfatos (Figura 6.4). Verifica-se um aumento do teor destes

contaminantes, essencialmente, nas lajes com incorporação de 10% de *grits*. De acordo com a caracterização química dos *grits* (Lopes, 2022), estes apresentam na sua constituição teores elevados de carbono orgânico dissolvido (430 mg/kg de resíduo seco) e de sulfatos (460 mg/kg de resíduo seco), o que pode influenciar o aumento destes componentes no lixiviado percolado. Ao contrário das lajes com incorporação de 10% de *grits*, as de 5% demonstram uma redução no teor de flúor (-0,1 mg/l) e carbono orgânico dissolvido (-0,85 mg/l) e um aumento do teor de sulfatos. Analisando o comportamento individual das lajes G1 e G2, verifica-se que este comportamento é igual nas duas (Quadro 6.2).

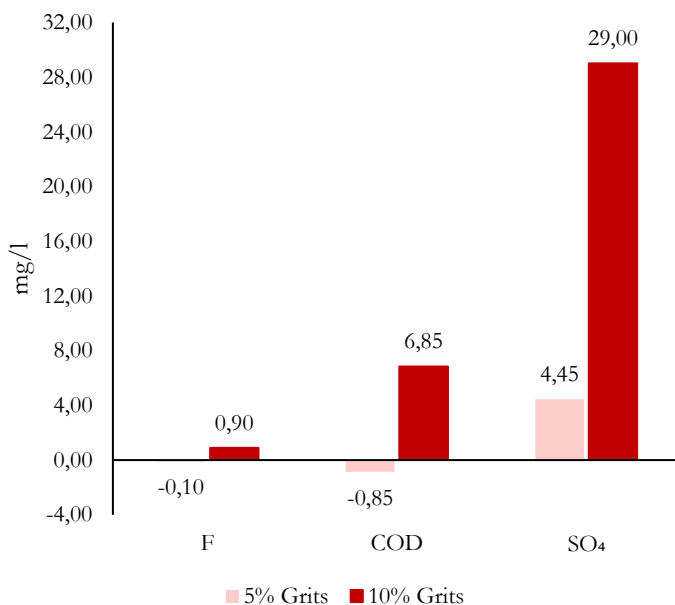


Figura 6.4. Principais contaminantes do lixiviado percolado nas lajes de pavimento, em relação à laje de referência

As diferenças no comportamento de cada grupo de lajes podem estar relacionadas com o facto de a água ter percolado pelas laterais da laje ao invés de passar pela laje, o que pode provocar um maior contacto da água com *grits* nas lajes G3 e G4 e, consecutivamente, transportar maior quantidade de contaminantes. Para além disso, as lajes G1 e G2, por terem uma pequena percentagem de *grits*, é provável que, à superfície das lajes, não haja uma grande quantidade de *grits*, o que dificulta o seu contacto com a água.

A incorporação de 5% de *grits* nas lajes de pavimento não influenciou, de forma significativa, o teor de contaminantes presentes no lixiviado em comparação à incorporação de 10% de *grits*. No entanto, ambas respeitaram os valores-limite de emissão estipulados pela legislação aplicável.

6.3 Escoamento superficial

Dada a importância do escoamento superficial com vista à verificação de possíveis impactes ambientais, faz-se, como mencionado em 5.5, uma comparação com os valores-limite estipulados pelo Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro e pelo Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto.

Os parâmetros geralmente analisados por suscitarem preocupações ambientais são os metais pesados e o HAP, devido ao seu potencial carcinogénico e genotóxico (Kriech & Osborn, 2022). Para os pavimentos rodoviários sem incorporação de resíduos, no que diz respeito aos metais pesados, a quantidade de contaminantes na água não tende a aumentar consoante a intensidade da precipitação (Yuan et al., 2017). A precipitação acumulada afeta a quantidade de cobre e chumbo, assim como a sua duração aumenta a presença de zinco e cádmio (Yuan et al., 2017), contudo nota-se um decréscimo de zinco, a longo prazo, devido ao envelhecimento do pavimento (Murphy et al., 2015). A quantidade de zinco está, igualmente, associada à qualidade do betume, à presença de resíduos de borracha na estrada e em zonas sob barreiras metálicas de proteção (James & Shahin, 1998; Murphy et al., 2015). A concentração de cádmio pode exceder o valor-limite principalmente nas águas intersticiais (Leitão, 2004). O crómio e o níquel, assim como o mercúrio estão relacionados com o intervalo de dias entre chuvas, ou seja, a ausência prolongada de precipitação dias faz com que uma maior quantidade de poluentes se acumule nas estradas (Singh et al., 2017; Yuan et al., 2017). Estes podem provir da deposição atmosférica, desgaste de acessórios dos veículos ou partículas do próprio pavimento rodoviário (Yuan et al., 2017). No entanto, o crómio é um elemento pouco móvel com tendência acumular-se no solo e, por isso, a concentração deste metal pesado nas águas é baixa (Leitão, 2004). Relativamente ao cobre, é um elemento associado, normalmente, à matéria orgânica do solo não apresentando, assim, concentrações elevadas no escoamento superficial (Leitão, 2004).

Nas misturas betuminosas a quente, a presença de bário provém dos agregados de calcário natural e são, geralmente, detetados baixos níveis encontrando-se, assim, abaixo dos limites regulamentares (Kriech & Osborn, 2022). De uma forma geral, a concentração de contaminantes do lixiviado que escoar na superfície dos pavimentos rodoviários de referência está abaixo dos valores-limite regulamentados (Araújo, 2016; Kriech & Osborn, 2022; Liu et al., 2021).

A incorporação de resíduos nas misturas betuminosas pode alterar a qualidade do lixiviado e apresentar um nível mais elevado de poluentes (Araújo, 2016) o que intensifica a necessidade de o analisar. No entanto, os estudos focam-se essencialmente na avaliação das propriedades mecânicas e na permeabilidade dos pavimentos com incorporação de resíduos (Liu et al., 2021) o que dificulta a avaliação dos possíveis impactes ambientais do lixiviado. Adicionalmente, vários autores relatam que um pavimento rodoviário permeável reduz a quantidade de contaminantes escoado devido à filtração no solo (Azadgoleh et al., 2022; Kriech

& Osborn, 2022; Liu et al., 2021; Murphy et al., 2015), no entanto não é feita uma análise aos impactes ambientais provocados no solo e nas águas subterrâneas (Endres et al., 2016).

Como mencionado em 3.2.1, os *grits* são essencialmente formados por carbonato de cálcio e óxido de cálcio. Estas características conferem aos *grits* a capacidade de remover os metais pesados através da sua precipitação e adsorção (Farage et al., 2020). Wang et al. (2016) relatam uma remoção de 93% de ferro e magnésio em aquíferos contaminados pelo lixiviado de aterros sanitários com barreiras permeáveis à base de carbonato de cálcio. A elevada porosidade deste material tem uma relação positiva com a remoção de contaminantes em meios aquosos devido ao fenómeno de difusão intrapartícula (Farage et al., 2020). Os *grits* apresentam, também, na sua constituição metais pesados, contudo os valores apresentados pela bibliografia demonstram que estes valores são insignificantes (Lopes, 2022; Modolo et al., 2009). A presença de metais num lixiviado de camadas intermédias de um aterro sanitário com incorporação de *grits* demonstrou respeitar os valores-limite, estipulados pela legislação, para a descarga em cursos de água (Farage et al., 2019). No Quadro 6.5, encontram-se os resultados obtidos em análises ao lixiviado estudado por Farage *et al.*, (2019), bem como ao lixiviado do aterro controlado da Celbi e é feita uma comparação com o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, que estabelece os valores-limite de emissão na descarga de águas residuais. Note-se que ambos os aterros são constituídos por diversos resíduos, incluindo *grits* e, ainda assim, o teor de contaminantes não excedeu o limite imposto pela legislação. No entanto, esta situação poderá não ser linear, devido às reações químicas entre os resíduos, relevando, assim, a importância de analisar regularmente os lixiviados dos aterros.

Quadro 6.5. Qualidade de lixiviados de aterros com presença de *grits*

	Colheita Celbi 02/2022 (mg/l)	(Farage et al., 2019) (mg/l)	DL n.º 236/98, 1 de agosto VLE (mg/l)
Ba	<0,10 (LQ)	-	-
Hg	<0,010 (LQ)	-	0,05
Cu	<0,20 (LQ)	< (LQ)	1,0
As	0,1	-	1,0
Se	<0,01 (LQ)	-	-
Ni	<0,25 (LQ)	0,05	2,0
Cr	<0,10 (LQ)	0,17	2,0
Cd	<0,01 (LQ)	< (LQ)	0,2
Zn	<0,10 (LQ)	< (LQ)	-
Sb	0,03	-	-
Pb	<0,25 (LQ)	< (LQ)	1,0
HAP	<0,5 (LQ)	-	-

Um estudo feito para avaliar a adição de *grits* (>30%) no fabrico de tijolos solo-cimento reporta que quanto maior a percentagem de resíduo adicionada maior é a quantidade de metais pesados presentes no lixiviado do tijolo (Alvarenga et al.,

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

2016). Desta forma, o teor de contaminantes pode não respeitar os valores-limite estipulados pela legislação para garantir a qualidade da água para consumo o que demonstra um risco para a saúde pública.

De uma forma geral, os resultados obtidos no ensaio de escoamento superficial (Quadro 6.6) apresentam menor quantidade de variações do teor de contaminantes, em relação ao ensaio de percolação (Quadro 6.2). Para além da maioria do teor de contaminantes, incluindo metais pesados, não atingir o limite de quantificação, os restantes não excedem os valores-limite de emissão estipulados pela legislação aplicável e a variação absoluta do teor de contaminantes entre as lajes com incorporação de resíduos e a laje de referência não é significativa. Relativamente às lajes G1 e G2, estas apresentam um comportamento semelhante na maioria dos contaminantes, à exceção do níquel que, em comparação à laje G1 referência, o seu teor aumenta na laje G2. No ensaio de percolação, a laje G2 apresenta um comportamento semelhante ao observado no ensaio de escoamento superficial. As lajes G3 e G4 apresentam uma diferença no teor de cobre, sendo que, na laje G3, o seu teor reduz e na laje G4 aumenta, o que não acontece no ensaio de percolação.

Quadro 6.6. Resultados obtidos à análise da água escoada superficialmente pelas lajes

	REF mg/l	G1 mg/l	G2 mg/l	G3 mg/l	G4 mg/l	DL n.º 236/98, 1 de agosto VLE mg/l	DL 102- D/2020, 10 de dezembro VLE mg/l
Sb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,7
As	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,0	5,0
Ba	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	-	100
Pb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	1,0	10
Cd	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,2	2,0
Cr	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	2,0	20
Cu	0,005	0,004	0,003	0,002	0,011	1,0	50
Mo	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	10
Ni	<0,001	<0,001	0,002	<0,001	<0,001	2,0	10
Hg	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,05	0,5
Se	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	-	0,5
Zn	0,019	0,011	0,009	0,006	0,009	-	50
COD	1,3	1,1	1,3	1,2	<1	-	800
Cl	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	<2,0	1,0	50 000
F	<1	<1	<1	<1	<1	-	250
SO ₄	<1	1,2	2,5	3,1	1,7	2000	20 000

À semelhança da análise do lixiviado percolado pelas lajes de pavimento, para melhor perceção da variação do teor de contaminantes, calculou-se a média e o desvio padrão dos valores para cada grupo de lajes de pavimento com a mesma percentagem de *grits* (Quadro 6.7) e assume-se o valor do limite de quantificação

para os contaminantes cuja quantidade foi inferior ao respetivo LQ. Nesse quadro, apresentam-se apenas os contaminantes que, efetivamente, apresentam variações no teor entre as diferentes lajes. À semelhança dos resultados do ensaio de percolação, o teor de sulfatos é o que apresentam um maior desvio padrão (0,9 mg/l) em ambas as lajes.

Quadro 6.7. Média e desvio padrão do teor de contaminantes de cada grupo de lajes de pavimento com incorporação de *grits*

	REF	5% Grits mg/l	Desvio padrão 5%	10% Grits mg/l	Desvio padrão 10%
Cu	0,0050	0,0035	0,0007	0,0065	0,0064
Ni	0,0010	0,0015	0,0007	0,0010	0,0000
Zn	0,0190	0,0100	0,0014	0,0075	0,0021
COD	1,3000	1,2000	0,1414	1,1000	0,1414
SO ₄	1,0000	1,8500	0,9192	2,4000	0,9899

No Quadro 6.8, tem-se a variação absoluta do teor de contaminantes das lajes com incorporação de *grits* que, efetivamente, apresentam uma variação em relação à laje de referência. Nas lajes com incorporação de 5% de *grits*, houve uma redução do teor de cobre e zinco e um aumento do teor de níquel, carbono orgânico dissolvido e sulfatos. As lajes com incorporação de 10% de *grits* apresentaram um aumento do teor de cobre e sulfatos, uma redução do teor de zinco e carbono orgânico e uma estabilização do teor de níquel.

Quadro 6.8. Variação absoluta do teor de contaminantes presentes no lixiviado escoado superficialmente nas lajes de pavimento com incorporação de *grits*, em relação à laje de referência

	5% <i>Grits</i> (G1 e G2) mg/l	10% <i>Grits</i> (G3 e G4) mg/l
Cu	-0,0015	0,0015
Ni	0,0005	0
Zn	-0,009	-0,0115
COD	0,225	-0,2
SO ₄	0,85	1,4

Os elementos com principal influência foram o carbono orgânico dissolvido e os sulfatos (Figura 6.5) que, como se conclui no capítulo 6.2, se deve à composição dos *grits*. No entanto, contrariamente aos resultados da análise do lixiviado percolado nas lajes de pavimento, verifica-se um aumento do teor de carbono orgânico dissolvido nas lajes de pavimento com incorporação de 5% de *grits*. Relativamente aos sulfatos, estes apresentam um comportamento semelhante ao do lixiviado percolado, ou seja, verifica-se um aumento do teor de sulfatos em comparação à laje de referência, no entanto, em quantidades muito inferiores. Apesar destas variações, os valores não excederam os valores-limite estipulados

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

pela legislação, o que confere, aos *grits*, um elevado potencial de aplicação em pavimentos rodoviários.

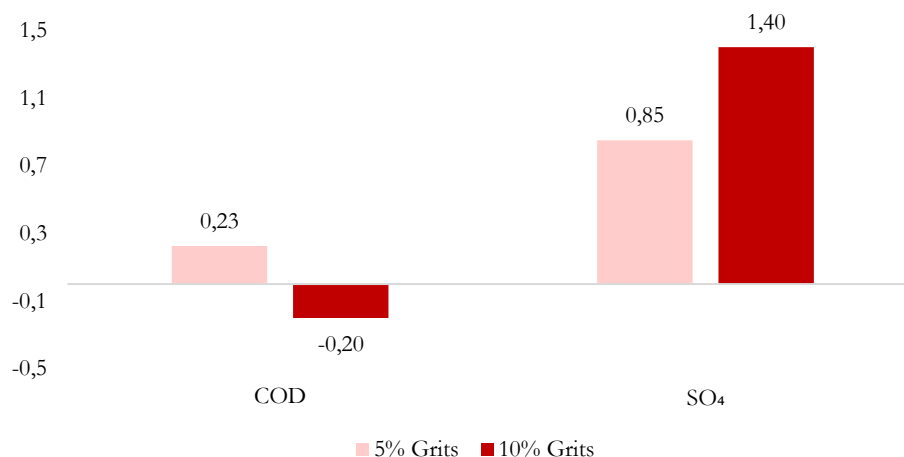


Figura 6.5. Principais contaminantes do lixiviado escoado superficialmente nas lajes de pavimento, em relação à laje de referência

Por forma a comparar os resultados obtidos nos dois ensaios, é apresentado, no Quadro 6.9, um resumo sobre o comportamento do teor de contaminantes, em relação à laje de referência. As setas a vermelho representam um aumento do teor de contaminantes e a verde representam uma redução. Relativamente às lajes com incorporação de 5% de *grits*, verifica-se que o teor de contaminantes teve um comportamento semelhante nos dois ensaios, à exceção do cobre que aumentou no ensaio de percolação (ensaio 1) e diminuiu no ensaio de escoamento (ensaio 2). Nas lajes com incorporação de 10% de *grits* verifica-se maior disparidade nos resultados, tendo em conta que apenas o teor de cobre e de sulfatos teve um comportamento semelhante. As variações dos elementos zinco e carbono orgânico dissolvido, que aumenta e reduz nos ensaios 1 e 2, respetivamente, são um exemplo desta disparidade. Adicionalmente, o teor de níquel reduziu no primeiro ensaio e manteve-se igual ao valor de referência no ensaio 2. Estes resultados demonstram que a incorporação de 10% de *grits* em lajes de pavimento não apresenta um padrão, o que dificulta a análise ambiental do lixiviado. Esta situação pode estar relacionada com problemas de amostragem ou com o tempo de contacto da água com as lajes.

Quadro 6.9. Comparação dos resultados do ensaio de percolação e de escoamento superficial

	REF		5% Grits		10% Grits	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 1	Ensaio 2
Cu	0,001	0,0050	↑	↓	↑	↑
Ni	0,002	0,0010	↑	↑	↓	=
Zn	0,028	0,0190	↓	↓	↑	↓
COD	7	1,3000	↓	↑	↑	↓
SO ₄	3,5	1,0000	↑	↑	↑	↑

De acordo com a bibliografia, as diferenças entre o lixiviado de um pavimento rodoviário impermeável de referência e outro com incorporação de resíduos são insignificantes (Araújo, 2016; PaperChain, 2021b). Os resultados obtidos neste ensaio vão ao encontro do previsto na revisão bibliográfica (Farage et al., 2019; Lopes, 2022; Modolo et al., 2009) e vêm comprovar que, de facto, não existem diferenças significativas entre as lajes de pavimento com e sem incorporação de resíduos. De uma forma geral, nenhuma das lajes de pavimento formuladas apresenta uma ameaça ambiental, dado que a concentração dos metais pesados foi inferior aos limites estipulados, eliminando, assim, o risco de dissipação de metais pesados potencialmente tóxicos aquando da lixiviação das misturas, demonstrando, assim, ser um problema que possa afetar a saúde pública. Contudo, testes de monitorização a longo prazo deverão ser feitos, por forma a perceber como o desgaste influencia a qualidade de um pavimento rodoviário com incorporação de *grits*.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A indústria papelreira, através do seu processo produtivo, produz uma grande quantidade de resíduos, podendo eles serem valorizados ou encaminhados para eliminação em aterro. Os resíduos que têm como destino final o aterro são, essencialmente, os da etapa da recuperação de químicos, os *dregs* e os *grits*. Apesar de serem considerados não perigosos, terem um carácter alcalino e serem constituídos, maioritariamente, por sódio, enxofre e cálcio constituem um desafio para as empresas deste setor. As restrições associadas aos aterros sanitários obrigam a que as empresas do setor de pasta e papel procurem por soluções de valorização ou reutilização dos seus resíduos.

Através da revisão da literatura, foi possível identificar várias alternativas à deposição em aterro dos resíduos da etapa de recuperação de químicos do processo produtivo de pasta e papel. Posteriormente, fez-se um estudo mais aprofundado na incorporação de *grits*, os resíduos do apagador, em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária.

Em todo o ciclo de vida de uma estrada existem possíveis impactes ambientais no meio ambiente. É, principalmente, na utilização da estrada, *i.e.* durante a sua vida útil, que se geram os maiores problemas, provenientes da erosão dos próprios materiais que compõem a estrada e da circulação de veículos que originam compostos com potencial de contaminar o solo, as águas subterrâneas, os cursos de água, entre outros. Estes compostos, como por exemplo os metais pesados, resultam da utilização do combustível, do desgaste dos componentes do veículo, da degradação da superfície de estrada, da aplicação de químicos em operações de manutenção ou até de fugas e derrames. Quando a concentração destes componentes é superior ao valor-limite estipulado pela legislação nacional constitui um perigo para a saúde pública e ambiental.

Com a incorporação de *grits* em misturas betuminosas para pavimentação rodoviária, torna-se ainda mais importante a avaliação do impacte ambiental nos solos e nas águas superficiais. Para contribuir para os estudos nesta matéria, foram realizados ensaios de percolação e de escoamento superficial em lajes de pavimento rodoviário com incorporação de *grits*, em percentagens de 5% e 10% com vista à verificação de possíveis contaminantes nos respetivos lixiviados. No entanto, não existe, ainda, um documento legal que estabeleça valores-limite para os contaminantes presentes nos lixiviados percolados ou escoados pela superfície das estradas. Por esta razão, foi feita uma comparação com a legislação nacional existente no âmbito da qualidade das águas residuais descarregas em meio hídrico, bem como a qualidade dos lixiviados em aterros não perigosos.

O ensaio de percolação permitiu verificar que a laje de pavimento com incorporação de *grits* com melhor capacidade drenante e a que mais se mostrou semelhante à laje de referência foi a G1_5%, com uma percentagem de absorção de água de 0,008%. Isto demonstra que os *grits* conferem alguma porosidade ao

pavimento. No entanto, os resultados obtidos foram muito voláteis e, por isso, não foi possível detetar nenhum padrão. Relativamente à análise da água percolada pelas camadas subjacentes às lajes de pavimento, verifica-se que, grande parte dos elementos não atinge o limite de quantificação, como por exemplo o chumbo. No entanto, nota-se a existência de alguma influência dos *grits* na contaminação do lixiviado, principalmente nos elementos flúor, carbonato de cálcio e sulfatos, que pode ser causado pela presença destes componentes na composição dos *grits*. As lajes de pavimento com incorporação de 5% de *grits* apresentam, maioritariamente, uma redução no teor de contaminantes, em comparação à laje de referência, ao contrário das lajes com incorporação de 10% de *grits*. Ainda assim, nenhum dos contaminantes presentes no lixiviado percolado nas lajes de pavimento excede o valor-limite estipulado pela legislação aplicável, comprovando a bibliografia (Cabral et al., 2008; Nurmesniemi et al., 2010). Desta forma, a incorporação de *grits* não demonstra comportamentos que impactem negativamente o solo e as águas subterrâneas, embora seja prudente a realização de testes de monitorização a longo prazo.

Vários autores reportaram que o impacto dos *grits* na qualidade do lixiviado é insignificante, não excedendo o valor-limite estipulado pela legislação (Araújo, 2016; Farage et al., 2020; PaperChain, 2021b). Adicionalmente, a componente de carbonato de cálcio presente nos *grits* confere-lhes a capacidade de remover os metais pesados através da sua precipitação e adsorção (Farage et al., 2019). Uma das principais dificuldades sentidas no ensaio de escoamento superficial foi a afinação do caudal que demorou semanas. Da análise ao lixiviado escoado superficialmente pelas lajes de pavimento, pode concluir-se que, de uma forma geral, existe alguma influência dos *grits* na qualidade do lixiviado. No entanto, esta não é significativa e o teor de contaminantes presente não excede o valor-limite estabelecido pela legislação.

Em suma, os lixiviados percolados demonstram o transporte de maior quantidade de contaminantes, em comparação aos lixiviados escoados, principalmente no teor de carbono orgânico dissolvido e sulfatos. Para além disso, as lajes com incorporação de 10% de *grits* apresentaram comportamentos contraditórios em alguns contaminantes, o que dificulta a avaliação do seu desempenho ambiental. Isto pode estar relacionado com problemas de amostragem ou até com o tempo de contacto da água com as lajes e os *grits*. Ainda assim, tanto os lixiviados percolados pelas camadas subjacentes às lajes como os lixiviados escoados superficialmente pelas lajes não apresentam teores contaminação superiores aos limites estipulados pela legislação nacional. Numa utilização de *grits* em grande escala, seriam mais as concentrações de poluentes derivados das fontes mencionadas em 5.4 e 5.5, do que provenientes dos *grits*.

A incorporação de *grits* em pavimentos rodoviários vem, assim, contribuir para a criação de cidades mais sustentáveis ao reduzir a quantidade de resíduos em aterro através da sua reutilização nas infraestruturas mais utilizadas para comunicação, as

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

estradas. Apresenta, igualmente, uma vantagem para a Celbi, visto que a quantidade de resíduos enviados para aterro reduz.

Propostas de trabalhos futuros

Futuramente, seria interessante replicar uma estrutura de pavimento com todas as camadas, incluindo o solo, e submetê-la a condições de serviço a médio longo prazo, como:

- Várias intensidades de precipitação;
- Diferentes temperaturas;
- Desgaste da laje;
- Resistência à fadiga, que consiste na medição da capacidade mecânica do material resistir a um elevado número de repetições de carga sem desenvolver fendas.

Dessa forma, a avaliação dos respetivos possíveis impactes ambientais no solo, nos cursos de água, na saúde pública e na própria estrada poderá facilitar a implementação de pavimentos rodoviários com incorporação de *grits* a uma escala industrial contribuindo, assim, para cidades mais sustentáveis. Ainda neste sentido, seria útil estabelecer uma metodologia oficial para avaliação de impactes ambientais das estradas, bem como a definição de valores-limite para o teor de contaminantes presentes nas águas de escorrência transportadas das estradas para o solo e para os cursos de água.

Atualmente, existem tecnologias que permitem realizar a simulação de chuvadas para avaliar o comportamento do solo. Dada a dificuldade sentida no decorrer dos ensaios, uma tecnologia semelhante para avaliar o comportamento dos pavimentos rodoviários poderá ser relevante para realizar os ensaios propostos neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEA. (2019). A Eficiência Na Utilização dos Recursos e os Resíduos. Agência Europeia Do Ambiente. <https://Www.Eea.Europa.Eu/Pt/Themes/Waste/Intro>
- Altri. (2021). Relatório De Sustentabilidade 2021 - Construindo Um Mundo + Renovável. https://Altri.Pt/Pt/Leitor-De-Pdf?File=2022/8/3dfea6b2-27f7-4e15-9645-9014dc45a97f.Pdf&Name=Altri_Relsustentabilidade_21_Pt_Spreads.Pdf
- Altri. (2023). Relatório & Contas 22.
- Alvarenga, R., Fassoni, D., Miranda, L., & Pinheiro, M. (2016). Evaluation of Adding Grits In The Manufacture Of Soil-Cement Bricks. *Rewas 2016: Towards Materials Resource Sustainability*.
- Apa. (2021). Plano Nacional De Gestão De Resíduos 2030 de Resíduo A Recurso. In Agência Portuguesa Do Ambiente.
- APA. (2022). Solos Contaminados-Guia Técnico Valores De Referência Para o Solo. In Agência Portuguesa Do Ambiente (Vol. 3).
- Araújo, J. (2016). Avaliação da Sustentabilidade de Estruturas e Materiais de Pavimentos Rodoviários. Universidade Do Minho.
- Azadgoleh, M. A., Mohammadi, M. M., Ghodrati, A., Sharifi, S. S., Palizban, S. M. M., Ahmadi, A., Vahidi, E., & Ayar, P. (2022). Characterization of Contaminant Leaching from Asphalt Pavements: A Critical Review of Measurement Methods, Reclaimed Asphalt Pavement, Porous Asphalt, And Waste-Modified Asphalt Mixtures. *Water Research*, 219, 118584. <https://Doi.Org/10.1016/J.Watres.2022.118584>
- Bacarin, G. B., Dognani, G., Dos Santos, R. J., Meirelles, M. G., Rodrigues, T. F., Klauck, C. R., Rodrigues, M. A. S., Jahno, V. D., Cabrera, F. C., & Job, A. E. (2020). Natural Rubber Composites With *Grits* Waste from Cellulose Industry. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(4), 1126–1139. <https://Doi.Org/10.1007/S10163-020-01011-8>
- Beiser, V. (2019). Why The World is Running Out of Sand. *Bbc Future*. <https://Www.Bbc.Com/Future/Article/20191108-Why-The-World-Is-Running-Out-Of-Sand>
- BIOND. (2022). Boletim Estatístico 2021.
- BIOND. (2022). Economia Circular - Missão 360. Missão 360. <https://Missao360.Com/Economia-Circular/>
- Cabral, F., Ribeiro, H. M., Hilário, L., Machado, L., & Vasconcelos, E. (2008). Use Of Pulp Mill Inorganic Wastes As Alternative Liming Materials. *Bioresource Technology*, 99(17), 8294–8298. <https://Doi.Org/10.1016/J.Biortech.2008.03.001>
- Carlos Medeiros, J., Adriano Albuquerque, J., Luiz Mafra, Á., Batistella, F., & Grah, J. (2009). Calagem Superficial com Resíduo Alcalino da Indústria de Papel e Celulose em

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Um Solo Altamente Tamponado. Secção Iv-Fertilidade Do Solo E Nutrição De Plantas. Revista Brasileira Da Ciência Do Solo, 33(2), 1657–1665.

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. Materials Engineering Innovation, 1(1), 74–90.

Ce. (2019). Comunicação Da Comissão Ao Parlamento Europeu, Ao Conselho Europeu, Ao Conselho, Ao Comité Económico E Social Europeu E Ao Comité Das Regiões: Pacto Ecológico Europeia. In Comissão Europeia. <https://Sustainabledevelopment.Un.Org/Post2015/Transformingourworld>.

Celbi. (n.d.-a). Apresentação Empresa. Celbi. Consultado a 7 de janeiro de 2023. Disponível em <https://Celbi.Pt/Pt/Press/Apresentacao-Empresa>

Celbi. (n.d.-b). Sistemas De Gestão & Certificações. Celbi. Consultado a 7 de janeiro de 2023. Disponível em <https://Celbi.Pt/Pt/Sustentabilidade/Sistemas-De-Gestao-Certificacoes>

Celbi. (2021). Declaração Ambiental.

CELPA. (2020). Setor Do Papel Investiu Mais De 72 Milhões No Ambiente Em Dez Anos - Sustentabilidade - Jornal De Negócios. Jornal De Negócios. <https://Www.Jornaldenegocios.Pt/Sustentabilidade/Detalhe/Setor-Do-Papel-Investiu-Mais-De-72-Milhoes-No-Ambiente-Em-Dez-Anos>

CEPI. (n.d.). Organisation. Cepi. Consultado a 1 de maio de 2023. Disponível em <https://Www.Cepi.Org/About-Cepi/Organisation/>

CEPI. (2022a). Key Statistics 2021: European Pulp & Paper Industry. <https://Library.Cepi.Org/>

CEPI. (2022b). Papermaking History. Confederation For European Paper Industries. https://Www.Cepi.Org/Wp-Content/Uploads/2020/05/Web_Infographic-Paper-History.Pdf

CEPI. (2022c). Snapshot | Cepi Sustainability Plaform. Cepi. <https://Sustainability.Cepi.Org/Snapshot/>

Costa, G. (2012). Análise Dos Critérios De Aceitação/Rejeição Do Caderno De Encargos Tipo Obra Da E.P. Para Pavimentação [Dissertação De Mestrado, Universidade Nova De Lisboa]. <https://Www.Researchgate.Net/Publication/230817387>

Crucho, J., Neves, J., Santos, L. P., & Capitão, S. D. (2020). Accelerated Laboratory Ageing Of Bituminous Mixtures Using The Teage Method. 8th Transport Research Arena Tra 2020. <https://Www.Researchgate.Net/Publication/339796859>

Dawson, A. (2007). Water Movement In Road Pavements And Embankments. www.watmove.org

Decisão 2014/955/UE da Comissão, de 18 de dezembro de 2014, que altera a Decisão 2000/532/CE relativa à lista de resíduos em conformidade com a Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho Texto relevante para efeitos do EEE, Pub. L. No.

L 370/44, Jornal Oficial da União Europeia 30.12.2014 (2014). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32014D0955>

Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro, Diário da República n.º 239/2020, 1o Suplemento, Série I de 2020-12-10 (2020). <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/102-d-2020-150908012>

Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, Diário da República n.º 176/1998, Série I-A de 1998-08-01 (1998). <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/236-1998-430457>

DGT. (2015). Cidades Sustentáveis 2020. https://www.dgterritorio.gov.pt/sites/default/files/ficheiros-cidades/cidades_sustentaveis2020.pdf

Dias, J., Batista, F., & Lopes, M. (2010). Assessment Of Fatigue Resistance And Aging Of Asphalt Mixtures In Portugal. Icti2010. http://repositorio.lnec.pt:8080/jspui/bitstream/123456789/1000512/1/Paper-Icti10_Afatramp.pdf

Diretiva 2008/98/CE Do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de novembro de 2008 Relativa Aos Resíduos E Que Revoga Certas Directivas, Pub. L. No. L312/3, Eur-Lex (2008). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pt/txt/pdf/?uri=celex:32008l0098&from=pt>

Diretiva (UE) 2018/850 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 1999/31/CE relativa à deposição de resíduos em aterros, Pub. L. No. L150/100, Jornal Oficial da União Europeia de 14.06.2018 (2018). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0850>

Endres, M., Brand, M., Tiffert, A., Schnell, M., Kocher, B., Marks, T., & Hilliges, R. (2016). Percolation And Contaminant Transport In Road Embankments With And Without Technical Safeguards To Reduce Percolation – Lysimeter Experiments. Transportation Research Procedia, 14, 2392–2401. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.274>

EP. (2014). 14.03 - Pavimentação - Características Dos Materiais. Estradas De Portugal, S.A., 3. <https://servicos.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/parceiros/fornecedores/gestao-de-contratos-de-empreitada/fornecedores-documentacao-ips>

EPA. (2023). DDT - A Brief History And Status. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/ddt-brief-history-and-status>

EPRC. (2022). Monitoring Report 2021. https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2020/10/19-2905_indus-

European Council. (2022a). Eurostat. Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/all_themes?lang=en&display=list&sort=category

European Council. (2022b). European Green Deal. European Council | Council Of The European Union. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

FAO, & UNEP. (2021). Global Assessment Of Soil Pollution: Report. In Global Assessment Of Soil Pollution: Report. Fao And Unep. <https://doi.org/10.4060/Cb4894en>

Farage, R. M. P., Quina, M. J., Gando-Ferreira, L., Silva, C. M., De Souza, J. J. L. L., & Torres, C. M. M. E. (2020). Kraft Pulp Mill *Dregs* And *Grits* As Permeable Reactive Barrier For Removal Of Copper And Sulfate In Acid Mine Drainage. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-020-60780-2>

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. *Journal Of Cleaner Production*, 239. <https://doi.org/10.1016/J.Jclepro.2019.117985>

Fernández-Rodríguez, J., Erdocia, X., Hernández-Ramos, F., Alriols, M. G., & Labid, J. (2019). Lignin Separation And Fractionation By Ultrafiltration. Separation Of Functional Molecules In Food By Membrane Technology, 229–265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815056-6.00007-3>

Fonseca, P., Pedroso, M., Tavares, V., Aguiar Costa, A., Santos, L., & Laranjeira, L. (2022). Relatório Do Estado Atual Da Circularidade No Setor Da Construção Em Portugal Ação. <https://circularidade.builtcolab.pt/>

Gomes, A., Ferreira, A. P., João, P., & Pinto, B. (2013). Materiais De Construção Cimento Portland E Adições.

Hasson, N. (2022). Plastic Replacements Driving Sustainability Trends In Pulp & Paper Industry. Fisher International.

IMT. (n.d.-a). Construção E Reabilitação De Pavimentos Agregados. In Instituto Mobilidade E Transportes. Consultado a 25 de março de 2023. Disponível em <https://www.imt-ip.pt/sites/imtt/portugues/infraestruturasrodoviaras/inovacaonormalizacao/paginas/divulgacaotecnica.aspx>

IMT. (n.d.-b). Directivas Para A Conceção De Pavimentos: Critérios De Dimensionamento De Pavimentos. Consultado a 25 de março de 2023. Disponível em <https://www.imt-ip.pt/sites/imtt/portugues/infraestruturasrodoviaras/inovacaonormalizacao/paginas/divulgacaotecnica.aspx>

IMT. (2009). Ensaio De Comparação Interlaboratorial Para Avaliação Da Sensibilidade À Água De Misturas Betuminosas Compactadas. https://www.imt-ip.pt/sites/imtt/portugues/infraestruturasrodoviaras/inovacaonormalizacao/divulgacao%20tecnica/seguranca_ensaios_avaliacao_sensib_agua.pdf

IMT. (2010). Norma De Traçado: Revisão. In Instituto Da Mobilidade E Dos Transportes, I.P.

INE. (2022). Portal Do Ine. Instituto Nacional De Estatística. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpgid=ine_main&xpid=ine&xlang=pt

IPMA. (2022a). Normal Climatológica - Coimbra/Bencanta (1981-2010). In Instituto Português Do Mar E Da Terra, I.P. https://www.ipma.pt/bin/file/data/climate-normal/Cn_81-10_Coimbra_Bencanta.pdf

IPMA. (2022b). Classificação Da Intensidade Da Precipitação Líquida. Instituto Português Do Mar E Da Atmosfera. https://www.ipma.pt/Pt/Educativa/Faq/Meteorologia/Previsao/Faqdetail.html?F=/Pt/Educativa/Faq/Meteorologia/Previsao/Faq_0033.html

James, W., & Shahin, R. (1998). Advances In Modeling The Management Of Stormwater Impacts, Volume 6. Computational Hydraulics International.

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What A Waste 2.0: A Global Snapshot Of Solid Waste Management To 2050. In What A Waste 2.0: A Global Snapshot Of Solid Waste Management To 2050. Washington, Dc: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

Kriech, A. J., & Osborn, L. V. (2022). Review Of The Impact Of Stormwater And Leaching From Pavements On The Environment. In Journal Of Environmental Management (Vol. 319). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115687>

Leitão, T. (2004). Impactes De Águas De Escorrência De Estradas Nos Solos E Nas Águas Subterrâneas. Síntese De Casos De Estudo Na Europa. Associação Portuguesa Dos Recursos Hídricos. <http://www.dha.lnec.pt/nas>

Liu, J., Li, H., Sun, L., Zhang, H., Xie, N., Tian, Y., Jia, M., Fu, K., Yu, B., & Zhu, Y. (2021). Leachate Risks Of Fine Solid Wastes In Porous Asphalt Pavement And Runoff Purification Effects Of Diatomite Filler. Journal Of Cleaner Production, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126623>

Lopes, A. R. (2022). Valorização De Resíduos Da Indústria De Pasta De Papel - Incorporação Em Misturas Betuminosas Para Pavimentação Rodoviária. Instituto Politécnico De Coimbra.

Losurdo, R. (2022). Consequences Of Poor Industrial Waste Disposal Methods/Services. Mcf Environmental Services. https://mcfenvironmental.com/poor-industrial-waste-disposal-methods/?Handl_url=https://mcfenvironmental.com/poor-industrial-waste-disposal-methods/

Marques, M. L., Jose Da Silva, E., Velasco, F. G., & Fornari Junior, C. C. M. (2014). Potencialidades Do Uso De Resíduos De Celulose (*Dregs/Grits*) Como Agregado Em Argamassas. Revista Brasileira De Produtos Agroindustriais, 423–431.

Mattila, H. P., & Zevenhoven, R. (2014). Production Of Precipitated Calcium Carbonate From Steel Converter Slag And Other Calcium-Containing Industrial Wastes And Residues. In Advances In Inorganic Chemistry (Vol. 66, Pp. 347–384). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420221-4.00010-X>

Modolo, R. (2006). Valorização De Resíduos Do Sector De Pasta E Papel Em Produtos Da Construção Civil. Universidade De Aveiro.

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

- Modolo, R., Benta, A., Ferreira, V. M., & Machado, L. M. (2009). Pulp And Paper Plant Wastes Valorisation In Bituminous Mixes. *Waste Management*, 30(4), 685–696. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.005>
- Mooselu, M. G., Liltved, H., Hindar, A., & Amiri, H. (2022). Current European Approaches In Highway Runoff Management: A Review. In *Environmental Challenges* (Vol. 7). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100464>
- Murphy, L. U., Cochrane, T. A., & O'sullivan, A. (2015). The Influence Of Different Pavement Surfaces On Atmospheric Copper, Lead, Zinc, And Suspended Solids Attenuation And Wash-Off. *Water, Air, And Soil Pollution*, 226(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2487-2>
- National Geographic. (2022). The Industrial Revolution . National Geographic Society. <https://education.nationalgeographic.org/resource/resource-library-industrial-revolution>
- Nguyen, D. (2021). Major Industrial Applications Use CaCO₃ Calcium Carbonate In Everyday Life. Linked In. <https://www.linkedin.com/pulse/major-industrial-applications-use-caco3-calcium-carbonate-nguyen-du/>
- 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. *Construction And Building Materials*, 184, 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.017>
- Nurmesniemi, H., Dahl, O., Watkins, G., & Pöykiö, R. (2010). Slaker *Grits* From The Causticising Process Of A Pulp Mill-A Potential Fertiliser And Liming Agent Material For Use In Agriculture And Forestry. *Int. J. Materials Engineering Innovation*, 1.
- Paiva, H. M., Simões, F., Morais, M. M., & Ferreira, V. (2020). Pilot Test Involving Pulp And Paper Industry Wastes In Road Pavements. *Wastes: Solutions, Treatments And Opportunities*, iii. <https://doi.org/10.1201/9780429289798-4>
- Palha, C. (2008). Misturas Betuminosas Para Camadas De Pavimentos Rodoviários. In Universidade Do Minho. http://www.civil.uminho.pt/cpalha/Misturas_Cpalha.Pdf
- PaperChain. (2021a). Guidelines For The Implementation Of The Circular Economy Models - Factsheet Cc1b - Glds And *Grits* Containing Asphalt Pavements.
- PaperChain. (2021b). The Final Event Of The Paperchain Project. PaperChain. <https://www.paperchain.eu/the-final-event-of-the-paperchain-project/>
- Pasandín, A. R., Pérez, I., Ramírez, A., & Cano, M. M. (2016). Moisture Damage Resistance Of Hot-Mix Asphalt Made With Paper Industry Wastes As Filler. *Journal Of Cleaner Production*, 112, 853–862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.016>
- PE. (2022). *Plastics - The Facts 2022*.
- Pértile, P., Albuquerque, J. A., Gatiboni, L. C., Costa, A., & Warmling, M. I. (2012). Application Of Alkaline Waste From Pulp Industry To Acid Soil With Pine (1) Patricia Pértile. *Revista Brasileira Da Ciência Do Solo*, 36, 939–950.

PPP. (2021). Pacto Português Para Os Plásticos. Pacto Português Para Os Plásticos. <https://www.pactoplasticos.pt/>

RAIZ. (2020). PaperChain: Sucesso Dos Demonstradores Comprovam Viabilidade De Economia Circular. Raiz - Instituto De Investigação Da Floresta E Papel. <http://raiz-lifp.pt/paperchain-sucesso-dos-demonstradores-comprovam-viabilidade-de-economia-circular/>

Reis, J., & Campello, L. (2018). Direitos Humanos E Os Desafios À Solidariedade Intergeracional No Cenário De Crise Ambiental Global. *Revista De Direitos Humanos Em Perspetiva*, 4(2), 124–145.

República Portuguesa. (2019). Roteiro Para A Neutralidade Carbónica 2050 (n.º 123). RNC2050; Diário Da República, 1.ª Série. <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>

República Portuguesa. (2020). Plano Nacional Energia E Clima 2030 Aprovado Em Conselho De Ministros. In República Portuguesa. <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=%3d%3dbaaaab%2blcaaaaaabacztdqyagdzs3qibaaaaa%3d%3d>

Ribeiro, J. (2013). Aplicação De Cinza De Biomassa No Solo: Estudo Do Perfil E Lixiviado [Tese]. Universidade De Aveiro.

Rocha, D. (2018). Valorização De Resíduos Na Indústria De Pasta De Papel - Gestão De Resíduos Orgânicos Gerados No Processo. Instituto Politécnico De Coimbra.

Salomão, P., Santos, J., Ferreira, R., Gonçalves, B., Carvalho, P., & Starich, R. (2019). Impactos Ambientais Gerados Pela Construção E Operação De Rodovias. *Research, Society And Development*, 8(10). <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i10.1368>

Santos, V. R., Cabrelon, M. D., Trichês, E. De S., & Quinteiro, E. (2019). Green Liquor Dregs And Slaker Grits Residues Characterization Of A Pulp And Paper Mill For Future Application On Ceramic Products. *Journal Of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118220>

Sha, A., Liu, Z., Jiang, W., Qi, L., Hu, L., Jiao, W., & Barbieri, D. M. (2021). Advances And Development Trends In Eco-Friendly Pavements. *Journal Of Road Engineering*, 1, 1–42. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2021.12.002>

Sijabat, E. K., Harmaji, A., & Khoirani, R. (2022). Utilization Of Grits And Dreg Wastes For Ceramics Raw Material. *Semesta Teknika*, 25(2), 179–187. <https://doi.org/10.18196/st.v25i2.14832>

Silva, H. (2006). Caracterização Do Mastique Betuminoso E Da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição Para O Estudo Do Comportamento Das Misturas Betuminosas [Tese De Doutoramento, Universidade Do Minho]. <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/5981>

Simão, L., Hotza, D., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J. A., Montedo, O. R. K., Simão, L., Hotza, D., Raupp-Pereira, F., Labrincha, J. A., & Montedo, O. R. K. (2018). Wastes From Pulp And Paper Mills - A Review Of Generation And Recycling Alternatives. *Cerâmica*, 64(371), 443–453. <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712414>

*Contribuições para a incorporação de resíduos industriais do fabrico de fibras
celulósicas no desenvolvimento de novos materiais de construção*

Simões, A. (2017). Economia Circular Na Indústria Cerâmica. Instituto Politécnico De Coimbra.

Singh, R. P., Wu, J., Kumar, A. J., & Fu, D. (2017). Study On Mercury Distribution And Speciation In Urban Road Runoff In Nanjing City, China. *Water (Switzerland)*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/W9100779>

Siqueira, F. B., & Holanda, J. N. F. (2013). Reuse Of *Grits* Waste For The Production Of Soil-Cement Bricks. *Journal Of Environmental Management*, 131, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.Jenvman.2013.09.040>

Söderholm, P., Bergquist, A. K., & Söderholm, K. (2019). Environmental Regulation In The Pulp And Paper Industry: Impacts And Challenges. In *Current Forestry Reports* (Vol. 5, Issue 4, Pp. 185–198). Springer. <https://doi.org/10.1007/S40725-019-00097-0>

Tiza, M. T., Iorver, V. T., & Iortyom, E. T. (2016). The Effects Of Poor Drainage System On Road Pavement: A Review. *International Journal For Innovative Research In Multidisciplinary Field*, 2(8). <https://www.Researchgate.Net/Publication/307167618>

Tran, H., & Vakkilainen, E. (2007). The Kraft Chemical Recovery Process.

UN. (n.d.-a). Goal 11: Sustainable Cities And Communities. United Nations - Sustainable Development Goals. Consultado a 7 de janeiro de 2023. Disponível em <https://www.un.org/Sustainabledevelopment/Cities/>

UN. (n.d.-B). What Is Climate Change? United Nations. Consultado a 13 de maio de 2023. Disponível em <https://www.un.org/en/climatechange/What-Is-Climate-Change>

UN. (1993). Report Of The United Nations Conference On Environment And Development. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/Undoc/Gen/N92/836/55/Pdf/N9283655.Pdf?OpenElement>

UN. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda For Sustainable Development United Nations United Nations Transforming Our World: The 2030 Agenda For Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/sites/default/files/publications/21252030%20agenda%20for%20sustainable%20development%20web.pdf>

UN. (2021). The Sustainable Development Goals Report. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/the-sustainable-development-goals-report-2021.pdf>

UN. (2022a). The Sustainable Development Goals Report. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/the-sustainable-development-goals-report-2022.pdf>

UN. (2022b). The 17 Goals . United Nations | Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>

UNEP. (2017). Goal 11: Sustainable Cities And Communities | . Un Environment Programme. <https://www.unep.org/explore-topics/sustainable-development-goals/why-do-sustainable-development-goals-matter/goal-11>

UNEP. (2019). Sand And Sustainability: Finding New Solutions For Environmental Governance Of Global Sand Resources.

Van Bohemen, H. D., & Van De Laak, W. H. J. (2003). The Influence Of Road Infrastructure And Traffic On Soil, Water, And Air Quality. *Environmental Management*, 31(1), 50–68. <https://doi.org/10.1007/S00267-002-2802-8>

Varela, N., & Vieira, F. S. (2005). Cimento: Uma Matéria-Prima Essencial No Fabrico De Argamassas. In *Apfac*. <https://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/paper%2037.pdf>

Wakefield, F. (2022). World Recycling Facts For 2022: Plastic, Paper And More | World Economic Forum. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2022/06/recycling-global-statistics-facts-plastic-paper/>

Wang, Y., Pleasant, S., Jain, P., Powell, J., & Townsend, T. (2016). Calcium Carbonate-Based Permeable Reactive Barriers For Iron And Manganese Groundwater Remediation At Landfills. *Waste Management*, 53, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.02.018>

WRI. (2022). Climate Data For Action | Climate Watch | Emissions And Policies. *Worlds Resource Institute*. <https://www.climatewatchdata.org/>

WWF. (2023). Pulp And Paper | Industries | WWF. *World Wild Fund*. <https://www.worldwildlife.org/industries/pulp-and-paper>

Yuan, Q., Guerra, H. B., & Kim, Y. (2017). An Investigation Of The Relationships Between Rainfall Conditions And Pollutant Wash-Off From The Paved Road. *Water (Switzerland)*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/W9040232>

Zoker, M. E., Karim, S., Kargbo, B., Kemoh, R., & Yorpoi, L. D. (2022). Impacts Of Road Constructions On Ecological Biodiversity And Livelihood In Sierra Leone. *International Journal Of Multidisciplinary Research And Growth Evaluation*, 280–296. <https://doi.org/10.54660/anfo.2022.3.3.18>